



UNED SERRA

CURSO DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

MÓDULO: VAZÃO



1ª EDIÇÃO

Janeiro 2006

SUMÁRIO

1 - MEDIÇÃO DE VAZÃO	3
2 - TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO	3
2.1 - MEDIDORES DE QUANTIDADE	3
2.1.1 - <i>Medidores de Quantidade por Pesagem</i>	3
2.1.2 - <i>Medidores de Quantidade Volumétrica</i>	3
2.2 - MEDIDORES VOLUMÉTRICOS.....	5
2.2.1 <i>MEDIÇÃO DE VAZÃO POR PRESSÃO DIFERENCIAL</i>	5
2.2.1.1 CONCEITOS BÁSICOS	8
2.2.1.2 PLACA DE ORIFÍCIO	16
2.2.1.3 TUBO VENTURI.....	20
2.2.1.4 BOCAL.....	22
2.2.1.5 TUBO PITOT	23
2.2.1.6 ANNUBAR	24
2.2.2 - <i>Medidores de Vazão por Pressão Diferencial Constante</i>	26
2.3 - MEDIDORES DE VAZÃO EM CANAIS ABERTOS	30
2.3.1 - <i>Vertedor</i>	30
2.3.2 - <i>Calha de Parshall</i>	30
2.4 - MEDIDORES ESPECIAIS DE VAZÃO	31
2.4.2 - <i>Medidor Tipo Turbina</i>	37
2.4.3 - <i>Medidor por Efeito Coriolis</i>	38
2.5 - MEDIDORES ULTRA-SÔNICOS.....	42
EXERCÍCIOS	45

1 - MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão inclui no seu sentido mais amplo, a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um determinado local na unidade de tempo; podem também ser incluídos os instrumentos que indicam a quantidade total movimentada, num intervalo de tempo.

A quantidade total movimentada pode ser medida em unidades de volume (litros, mm³, cm³, m³, galões, pés cúbicos) ou em unidades de massa (g, kg, toneladas, libras). A vazão instantânea é dada por uma das unidades acima, dividida por uma unidade de tempo (litros/min, m³/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em kg/h ou em m³/h.

Quando se mede a vazão em unidades de volume, devem ser especificadas as "condições base" consideradas. Assim no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera "nas condições de operação", ou a 0 °C, 20 °C, ou a outra temperatura qualquer. Na medição de gases, é comum indicar a vazão em Nm³/h (metros cúbicos normais por hora, ou seja a temperatura de 0 °C e a pressão atmosférica) ou em SCFM (pés cúbicos standard por minuto - temperatura 60 °F e 14,696 PSia de pressão atmosférica). Vale dizer que:

1 m³ = 1000 litros

1 galão (americano) = 3,785 litros

1 pé cúbico = 0,0283168 m³

1 libra = 0,4536 Kg

2 - TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO

Existem dois tipos de medidores de vazão, os medidores de quantidade e os medidores volumétricos.

2.1 - MEDIDORES DE QUANTIDADE

São aqueles que, a qualquer instante permitem saber que quantidade de fluxo passou mas não vazão do fluxo que está passando. Exemplo: bombas de gasolina, hidrômetros, balanças industriais, etc.

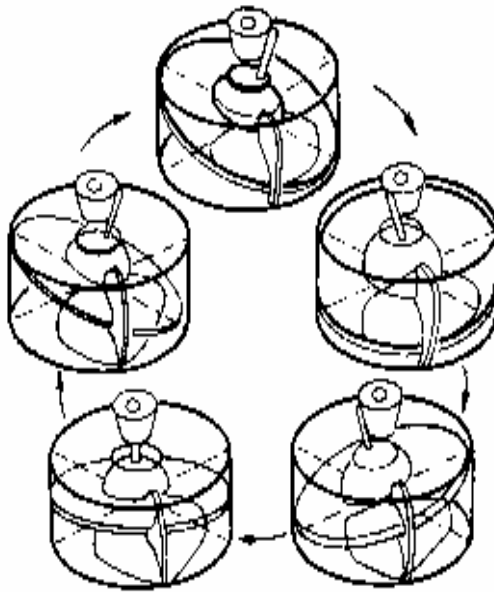
2.1.1 - Medidores de Quantidade por Pesagem

São utilizados para medição de sólidos, que são as balanças industriais.

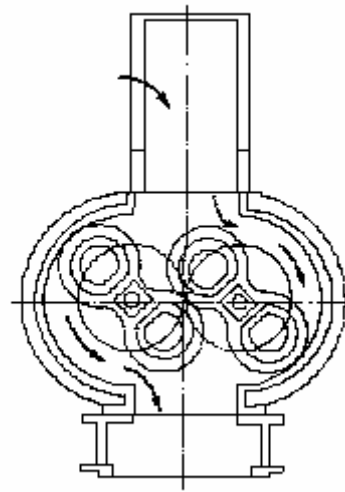
2.1.2 - Medidores de Quantidade Volumétrica

São aqueles que o fluido, passando em quantidades sucessivas pelo mecanismo de medição faz com que o mesmo acione o mecanismo de indicação.

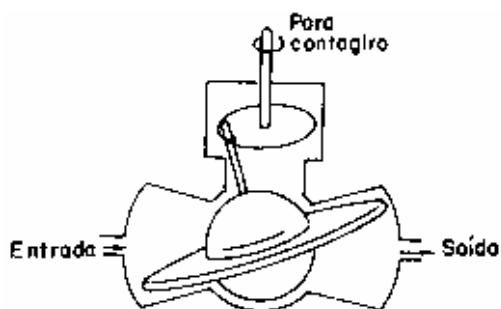
São estes medidores que são utilizados para serem os elementos primários das bombas de gasolina e dos hidrômetros. Exemplo: disco nutante, tipo pistão rotativo oscilante, tipo pistão alternativa, tipo pás, tipo engrenagem, etc.



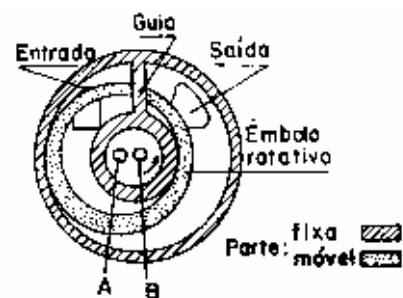
Tipo Pás Giratórias



Tipo de Engrenagem



Disco Nutante



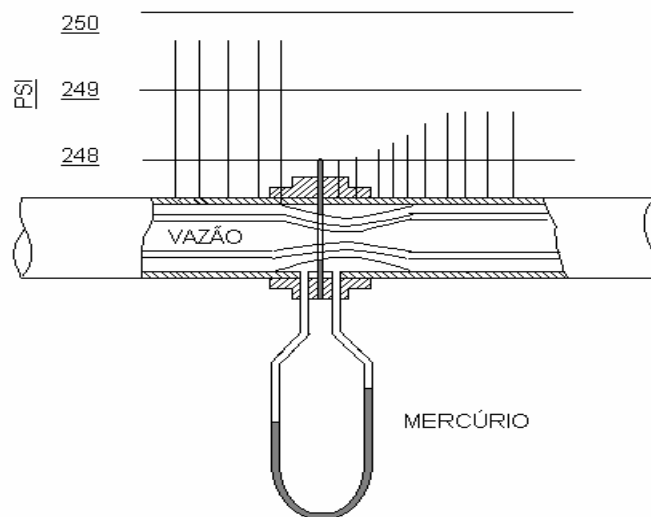
Tipo Pistão Rotativo

2.2 - MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

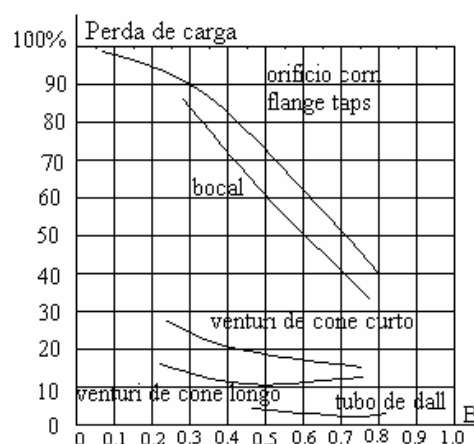
São aqueles que exprimem a vazão por unidade de tempo.

2.2.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO POR PRESSÃO DIFERENCIAL

A pressão diferencial é produzida por vários tipos de elementos primários colocados na tubulação de forma tal que o fluido passa através deles. A sua função é aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. A vazão pode então, ser medida a partir desta queda.



Uma vantagem primordial dos medidores de vazão por ΔP , é que os mesmos podem ser aplicados numa grande variedade de medições, envolvendo a maioria dos gases e líquidos, inclusive fluidos com sólidos em suspensão, bem como fluidos viscosos, em uma faixa de temperatura e pressão bastante ampla. Um inconveniente deste tipo de medidor é a perda de carga que o mesmo causa ao processo, sendo a placa de orifício, o qual provoca a maior perda de carga "irrecuperável" (de 40 a 80% do ΔP gerado)



A tabela à seguir mostra as características dos vários elementos deprimogênios usados:

TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO	Líquido limpo	Líquido viscoso	Líquido sujo	Gases/ vapores	Líquido corrosivo	Lodos ou poupas abrasivas	Temperaturas altas	Temperaturas criogênicas	Limite mínimo de N ° de Reynolds
1- Elementos deprimogênios									
.placas de orifício concêntrico									
flange taps			□					O	>8000
coner taps								O	>5000
radius taps			□					O	>8000
vena contracta taps			□					O	>6000
pipe taps			□					O	>14000
. Placas de orifício excêntrico	O								>10000
placas de orifício segmental	O								>10000
placas de orifício de 1/4 círculo			□	O		O		O	>250
placas de orifício de entrada cônica				O				O	>25
. bocal de vazão									
ISA					O	O	O		>20000
ASME					O	O	O		>6000
.Tubo venturi									
clássico fundido			□	O	O	O	O		>40000
clássico usinado			□		O	O	O	O	>50000(d)
clássico soldado			□		O	O	O		>40000
truncado			□		O	O	O		>80000
venturi bocal					O	O	O		>80000
em dutos retangulares	O		O			O	O		>200000
. Tubo de Pitot							O		>2000
.Micro venturi					O		O		>10000
.Aerofólio							O		>80000

LEGENDA

Recomendado

d: O valor indicado se refere a Rd e não Rp, como nos outros casos

O : Aplicável

□ : Aplicável quando a condição adversa é moderada e usando acessórios adequados

TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO	ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS						INSTALAÇÃO				
1- Elementos deprimogênios	Tamanho		Largura de faixa	Precisão %		Escala	sinal	Facilidade de instalação	Filtro	Trecho reto	Posição
	Min(mm)	Máx(mm)		Padrão	Calibrado						
.placas de orifício concêntrico											
flange taps	50	760	3,5:1	±1,5	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
coner taps	50	1000	3,5:1	±1,5	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
radius taps	50	760	3,5:1	±1,4	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
vena contracta taps	50	760	3,5:1	±1,4	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
pipe taps	50	300	3,5:1	±1,7	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
. Placas de orifício excêntrico	100	350	3,5:1	±2,1	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
placas de orifício segmental	100	350	3,5:1	±2,2	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
placas de orifício de 1/4 círculo	25	760	3,5:1	±2,2	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
placas de orifício de entrada cônica	25	?	3,5:1	±2,2	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer

. bocal de vazão											
ISA	50	760	3,5:1	±2,2	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
ASME	50	200	3,5:1	±2,2	±0,75	√	Δ	Fácil	não	necs.	Qualquer
.tubo venturi								razoavel/			
clássico fundido	100	800	3,5:1	±1,7	±0,75	√	Δ	fácil	não	necs.	Qualquer
clássico usinado	50	250	3,5:1	±1,7	±0,75	√	Δ	“	não	necs.	Qualquer
clássico soldado	200	1200	3,5:1	±1,7	±0,75	√	Δ	“	não	necs.	Qualquer
truncado	200	1200	3,5:1	±1,7	±0,75	√	Δ	“	não	necs.	Qualquer
venturi bocal	75	500	3,5:1	±4.0	±0,75	√	Δ	“	não	necs.	Qualquer
em dutos retangulares			3,5:1	±5.0	±1,0	√	Δ	“	não	pref.	Qualquer
. Tubo de Pitot	200	Qualquer	3,5:1	±1,5	±0,75	√	Δ	muito fácil	não	necs.	Qualquer
.Micro venturi	300	“	3,5:1	±3,0	-	√	Δ	muito fácil	não	necs.	Qualquer
.Aerofólio			3,5:1	±5.0	±1.0	√	Δ	razoável/ fácil	não	mínimo	Qualquer

TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO	CONSIDERAÇÕES ECONOMICAS			PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS INCOVINIENTES
	Manutenção	Preço relativo	Perda de carga		
1- Elementos deprimogênicos	Verificação periódica	Barato	Média	Facilidade de fabricação Existência de dados para larga faixa de aplicação Largamente aceitos	Baixa largura de faixa Necessidade do elemento secundário Necessidades de longos trechos retos
.placas de orifício concêntrico					
flange taps					
coner taps					
radius taps					
vena contracta taps					
pipe taps					
. Placas de orifício excêntrico					
placas de orifício segmental					
placas de orifício de 1/4 círculo					
placas de orifício de entrada cônica	Verificação periódica	Médio	Média	Aplicação à fluidos erosivos	Usinagem mais elaborada que a placa de orifício
. bocal de vazão					
ISA	Verificação periódica	Médio+	Baixa	Baixa perda de carga Aplicação a fluidos erosivos	Custo de fabricação elevado
ASME					
.tubo venturi					
clássico fundido					
clássico usinado					
clássico soldado					
truncado					
venturi bocal					
em dutos retangulares					
. Tubo de Pitot	Verificação periódica	Barato	muito baixa	Facilidade de instalação	Baixa pressão operacional ; difícil de medir; precisão medíocre Custo de fabricação elevado
.Micro venturi					
.Aerofólio	Verificação periódica	Médio +	muito baixa	Baixa perda de carga pouco trecho reto	

2.2.1.1 CONCEITOS BÁSICOS

2.2.1.1.1 Equação da continuidade

Supondo um fluxo em regime permanente na tubulação abaixo, onde não se pode acumular massa no volume compreendido entre as seções 1 e 2, pois neste caso pelo menos a massa específica variaria deixando estar em regime permanente.

Baseando-se na figura abaixo, pode-se afirmar que o fluxo de massa que passa em qualquer plano transversal ao tubo deve ser sempre igual. Ou seja, o fluxo de massa no plano P tem que ser igual ao que passa pelo Q.



A massa de fluido Δm_1 que atravessa a seção A1 do plano P no intervalo de tempo Δt é igual a:

$$\Delta m_1 = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1$$

Onde:

$\frac{\Delta m_1}{\Delta t}$ = fluxo de massa pela seção A1 [Kg/s], normalmente denominado por vazão

mássica [massa/tempo];

v_1 = velocidade de escoamento pelo plano P [m/s];

A_1 = área da seção transversal do plano P [m²].

Considerando que o intervalo de tempo Δt tenda a zero, pode-se afirmar que v_1 e A_1 são constantes, ou seja a velocidade não varia ao longo da seção A1. Assim, o fluxo de massa pelo plano P é igual ao fluxo de massa do plano Q.

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t}$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

mas, para fluidos incompressíveis, $\rho_1 = \rho_2$, o que simplifica a expressão anterior em:

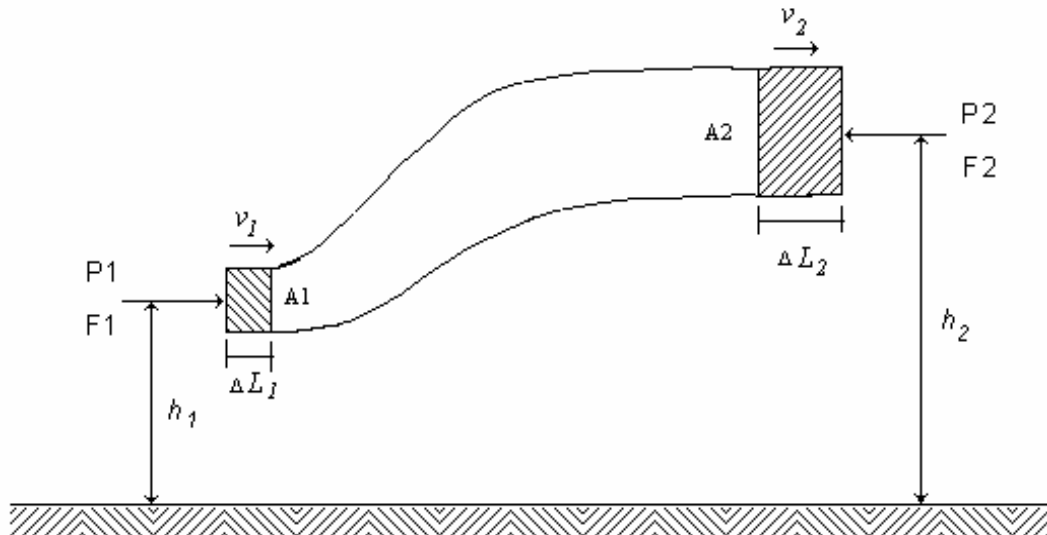
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \text{ [m}^2 \cdot \text{m/s} = \text{m}^3/\text{s}]$$

Então, $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{constante}$ que é denominado de fluxo volumétrico ou simplesmente de vazão volumétrica. A unidade de medição é dada em volume/tempo, por exemplo, l/h, m³/h, m³/s.

2.2.1.1.2 Equação de Bernoulli

Supondo um fluido perfeito (ideal), que não possui viscosidade, ele desloca-se sem atritos e portanto sem perdas de energia.

O trabalho realizado pela resultante das forças que atuam em um sistema é igual à variação da energia cinética – teorema trabalho-energia.



Dados:

F_1 = força aplicada à superfície A_1

P_1 = razão entre F_1 e A_1 ;

ΔL_1 = distância que o fluido deslocou;

v_1 = velocidade de deslocamento;

h_1 = altura relativa à referência gravitacional

Para o plano 2 basta atualizar os sub-índices.

O trabalho realizado por cada componente da força resultante é:

1 – Trabalho realizado pela força F_1 .

$$W_1 = F_1 \cdot d_1 = P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta L_1 \quad \text{Onde: } F_1 = P_1 \cdot A_1$$

2 – Trabalho realizado pela força F_2 .

$$W_2 = -F_2 \cdot d_2 = -P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta L_2 \quad \text{Onde: } F_2 = P_2 \cdot A_2$$

3 – Trabalho realizado pela força da gravidade.

$$W_3 = F_3 \cdot d_3 = -m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

O trabalho total realizado sobre o sistema é: $W_T = W_1 + W_2 + W_3$

Logo:

$$W_T = P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta L_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta L_2 - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Mas $A_1 \cdot \Delta L_1 = A_2 \cdot \Delta L_2 = \text{volume } V \text{ deslocado pela ação resultante das forças. Como}$
 é de conhecimento, $V = \frac{m}{\rho}$. Então, $A_1 \cdot \Delta L_1 = \frac{m}{\rho}$. E, substituindo na equação do trabalho resultante
 tem-se:

$$W_T = \frac{m}{\rho}(P_1 - P_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

A variação da energia cinética neste sistema é a diferença da energia final menos a inicial, ou:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

Igualando o trabalho resultante com a variação da energia cinética, tem-se:

$$W_T = \Delta E_c$$

$$\frac{m}{\rho}(P_1 - P_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

simplificando,

$$\cancel{\frac{m}{\rho}(P_1 - P_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)} = \cancel{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

reagrupando e separando os termos,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Esta é a equação de Bernoulli que comprova que o somatório das pressões ao longo de um tubo é sempre constante para um sistema ideal. Nesta equação pode-se reconhecer as seguintes pressões:

$$\underbrace{P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1}_{\text{Pressão aplicada}} = \underbrace{P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2}_{\text{Pressão Dinâmica}} + \underbrace{\rho \cdot g \cdot h_2}_{\text{Pressão Estática}}$$

2.2.1.1.3 Equação básica para elementos deprimogênicos

Baseado na equação da continuidade para fluido incompressível:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \implies v_1 = \frac{A_2 \cdot v_2}{A_1}$$

Fazendo: $\beta = \frac{d}{D}$, onde d é o diâmetro relativo a A_2 e D a A_1 , tem-se:

$$\beta^2 = \frac{A_2}{A_1}$$

ou seja:

$$v_1 = \beta^2 \cdot v_2$$

Substituindo na equação de Bernoulli e considerando h_1 igual a h_2 :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot v_1^2 + h_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot v_2^2 + h_2$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot v_2^2 - \frac{1}{2 \cdot g} \cdot v_1^2$$

Onde $\gamma = \rho \cdot g$ que é denominado por peso específico, assim:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - (\beta^2 \cdot v_2)^2}{2 \cdot g}$$

Isolando v_2 , temos

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - (\beta^2 \cdot v_2)^2}{2 \cdot g} = \frac{v_2^2 - \beta^4 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} = \frac{v_2^2 (1 - \beta^4)}{2 \cdot g}$$

$$v_2^2 = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot \frac{2 \cdot g}{(1 - \beta^4)}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot \frac{2 \cdot g}{(1 - \beta^4)}}$$

e, denominando $E = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^4)}}$, reescremos v_2 como:

$$v_2 = E \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2 \cdot g}$$

Logo, v_1 será:

$$v_1 = \beta^2 \cdot E \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2 \cdot g}$$

A equação anterior é puramente teórica, principalmente pelo fato de considerar que, nas seções 1 e 2, as velocidades são uniformemente distribuídas e respectivamente iguais a v_1 e v_2 . Esta equação pode ser transformada adequadamente para uso prático, se incluirmos um coeficiente de

correção que leve em consideração todos elementos de um escoamento real. Este coeficiente, chama-se coeficiente de descarga C :

$$C = \frac{\text{vazão real}}{\text{vazão teórica}}$$

$$\text{vazão real} = C \cdot \text{vazão teórica}$$

Os valores de C , são resultados experimentais e para cada tipo de elemento deprimogênio e sistema de tomada de impulso, C varia em função do diâmetro (D) da tubulação, do N° de Reynolds (Rd) e da relação dos diâmetros referentes a seção A_1 e A_2 ($\beta = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$).

$$C = f(D, Rd, \beta)$$

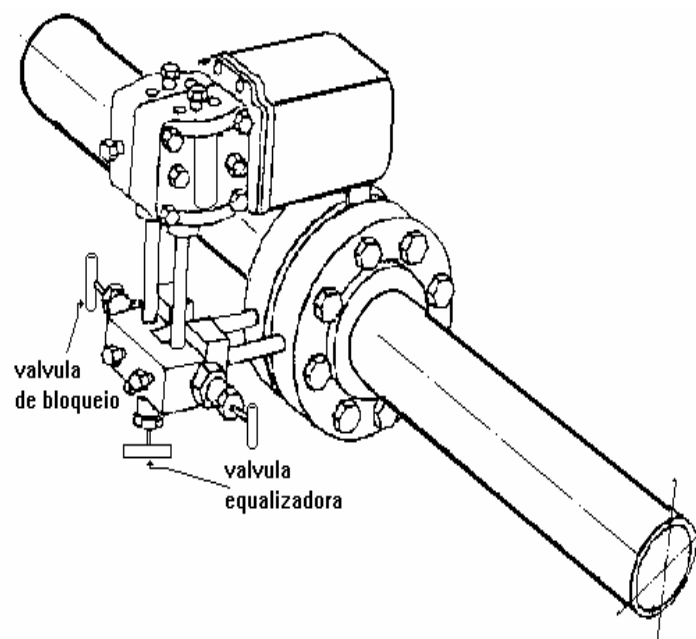
Daí:

$$Q = A_1 \cdot v_1$$

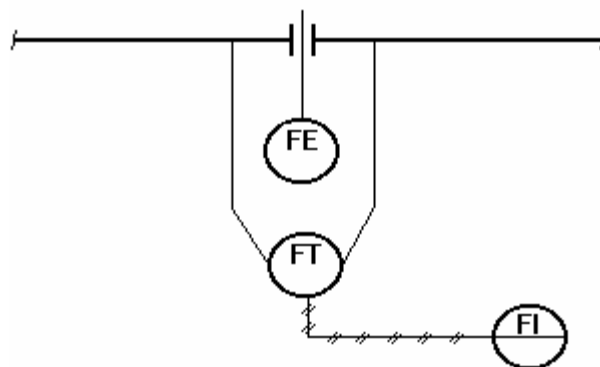
$$Q_{real} = A_1 \cdot C \cdot \beta^2 \cdot E \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \cdot 2 \cdot g}$$

2.2.1.1.4 Malha para medição de vazão

Na indústria, o método mais utilizado para medir vazão pelo princípio da pressão diferencial variável é através da placa de orifício.



Podemos representar esquematicamente esta malha de medição, através do fluxograma mostrado abaixo:



Da equação alcançada no item anterior pode-se concluir que a vazão só irá variar em função de $\sqrt{\Delta P} = \sqrt{P_1 - P_2}$, pois $A_1, E, C, \beta, g, \gamma$ são constantes. Portanto, podemos simplificar a expressão, assim:

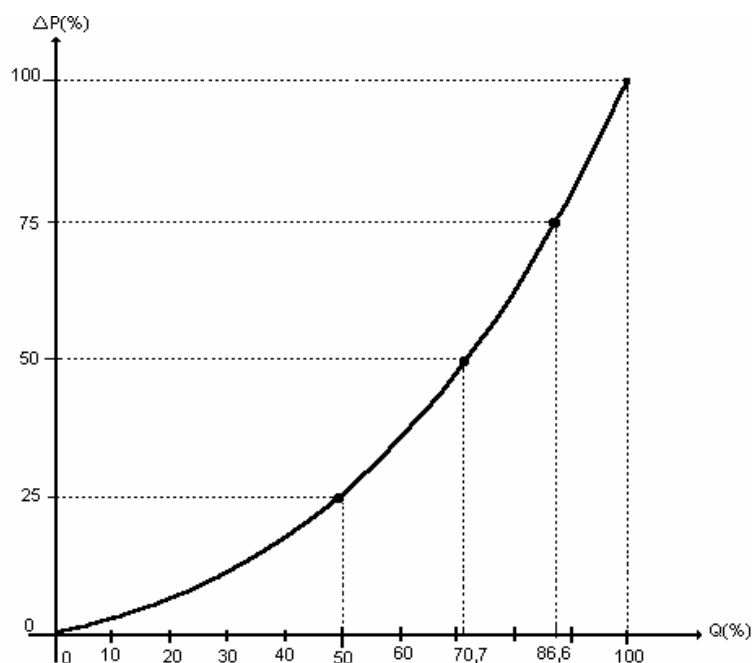
$$Q = K \cdot \sqrt{\Delta P}$$

onde:

K = Constante que depende de fatores como:

- . Relação entre orifício e tubulação
- . Características do fluido

É importante observar, que o ΔP varia quadraticamente em função da vazão Q .



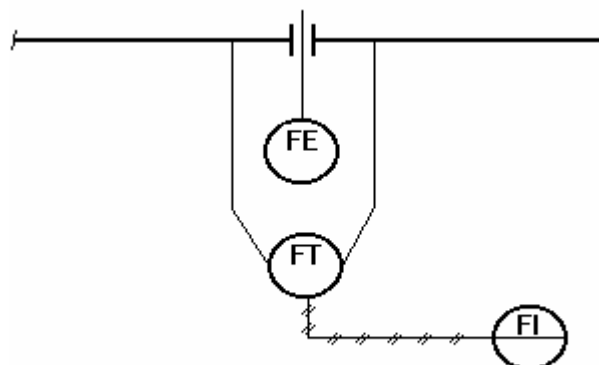
vazão	ΔP
0,0	0,0
50,0	25,0
70,7	50,00

86,6	75,00
100,00	100,00

Analisando o fluxograma anterior teremos:

"Q"	ΔP	saída do FT	Indicação do FI escala linear	Indicação do FI escala quadrática
100	100	100	100	100
50	25	25	25	50
0	0	0	0	0

Supondo o fluxograma abaixo, sabe-se que esta malha possui como características: Vazão máxima de 10 m³/H e o ΔP produzido com esta vazão é de 2500 mmH₂O. Como saber a pressão de saída do transmissor (FT), quando a vazão for 8 m³/H ?



Determinação do K:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}}$$

Para vazão máxima: $K = \frac{10}{\sqrt{2500}} = \frac{10}{50} = 0,200 \text{ (m}^3/\text{H , mmH}_2\text{O)}$

Daí:

$$\Delta P = (Q/K)^2 = (8/0,2)^2 = 1600 \text{ =====> } \Delta P = 1600 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Então:

Pressão de Saída do FT = P_{FT}

$$P_{FT} = \Delta P / \text{Span de } \Delta P \times 12 + 3 = 1600 / 2500 \times 12 = 3$$

$$P_{FT} = 10,68 \text{ PSI}$$

Outro método de trabalho, baseia-se no cálculo em porcentagem adotando-se $K = 10$.

Então:

$8 \text{ m}^3/\text{H}$ equivale a 80% da vazão

portanto:

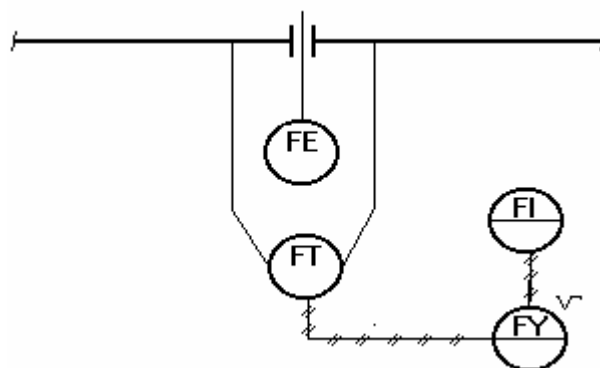
$$Q = K \times \sqrt{\Delta P} \implies \Delta P = (Q/K)^2 = (80/10)^2 = 64$$

$$\Delta P = 64 \%$$

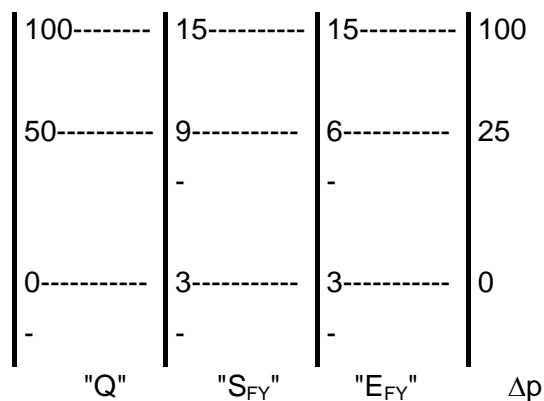
$$P_{FT} = (\Delta P \% / 100 \times 12) + 3 \implies P_{FT} = 0,64 \times 12 + 3$$

$$P_{FT} = 10,68 \text{ PSI}$$

O sinal de saída de um transmissor de vazão por pressão diferencial variável, varia linearmente em função do ΔP e quadraticamente em função da vazão, portanto quando é acoplado um indicador para fazer a leitura de vazão vinda do transmissor, sua escala deve ser quadrática para termos leitura direta. Para linearizar o sinal de saída do transmissor em função de vazão, faz-se necessário o uso de um EXTRATOR DE RAIZ QUADRADA, conforme mostrado no fluxograma abaixo.



A pressão de entrada no extrator (E_{FY}), é linearmente proporcional ao ΔP e a pressão de saída do extrator (S_{FY}), é linearmente proporcional à vazão Q , então:



Daí:

$$S_{FY} = \frac{\sqrt{E_{FY}-3}}{12} \cdot 12 + 3 \text{ (PSI)}$$

$$E_{FY} = [(S_{FY}-3)/12]^2 \cdot 12 + 3 \text{ (PSI)}$$

Supondo que na entrada do extrator a pressão seja 10,68 PSI, qual a pressão em sua saída?

$$E_{FY} = 10,68 \text{ PSI}$$

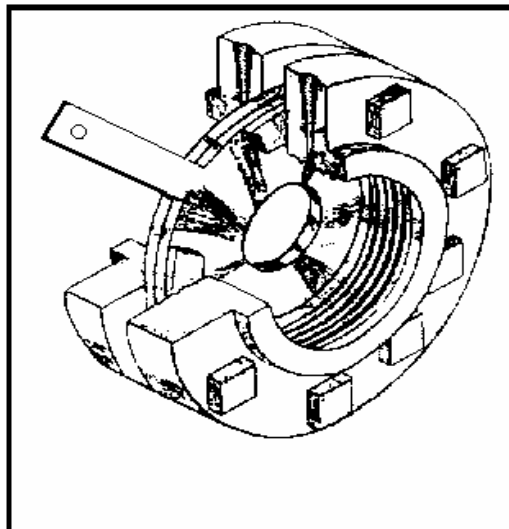
$$S_{FY} = \frac{\sqrt{10,68-3}}{12} \cdot 12 + 3 = 0,8 \cdot 12 + 3 = 12,6$$

$$S_{FY} = 12,6 \text{ PSI}$$

2.2.1.2 PLACA DE ORIFÍCIO

Dos muitos dispositivos inseridos numa tubulação para se criar uma pressão diferencial, o mais simples e mais comum empregado é o da placa de orifício.

Consiste em uma placa precisamente perfurada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação.



É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque, se ficarem, imprecisas ou corroídas pelo fluido, a precisão da medição será comprometida. Costumeiramente são fabricadas com aço inox, monel, latão, etc., dependendo do fluido

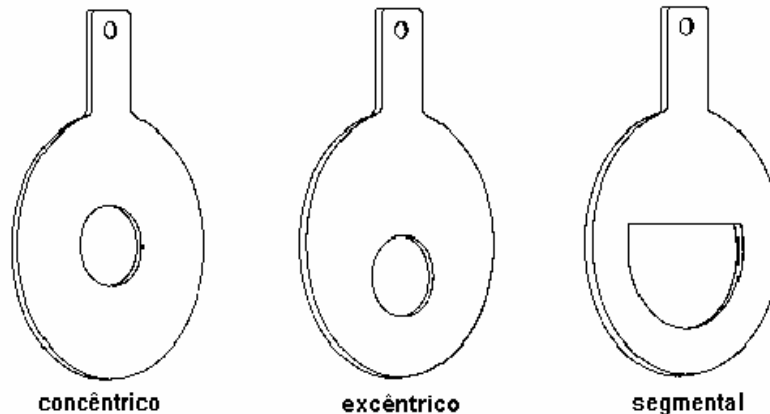
.VANTAGENS

- Instalação fácil
- Econômica
- Construção simples
- Manutenção. e troca simples

.DESVANTAGENS

- Alta perda de carga
- Baixa Rangeabilidade

Tipos de Orifícios



A. Orifício concêntrico

Este tipo de placa é utilizado para líquidos, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão.

B. Orifício excêntrico

Utilizada quando tivermos fluido com sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo.

C. Orifício segmental

Esta placa tem a abertura para passagem de fluido, disposta em forma de segmento de círculo. É destinada para uso em fluidos laminados e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

Tipos de Borda

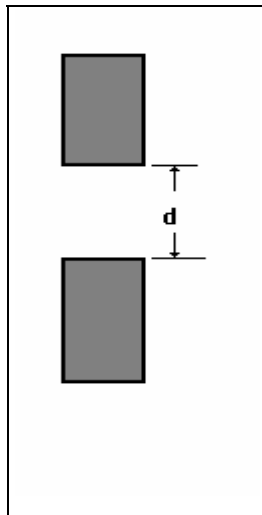
A. Borda Quadrada (Aresta viva):

Usado em tubulações normalmente maiores que 6".

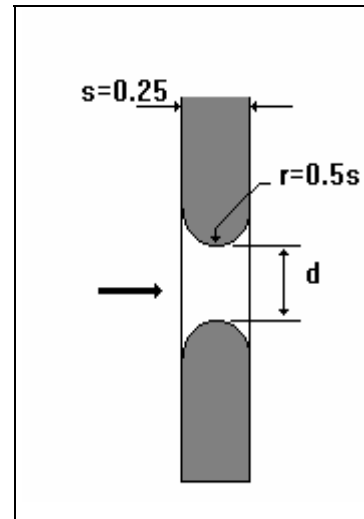
Não usada em fluxo com baixos N° de RD.

B. Borda Arredondada (Quadrante edge ou quarto de círculo):

Usado em fluidos altamente viscosos, onde o N° de RD inferior está em torno de 250.



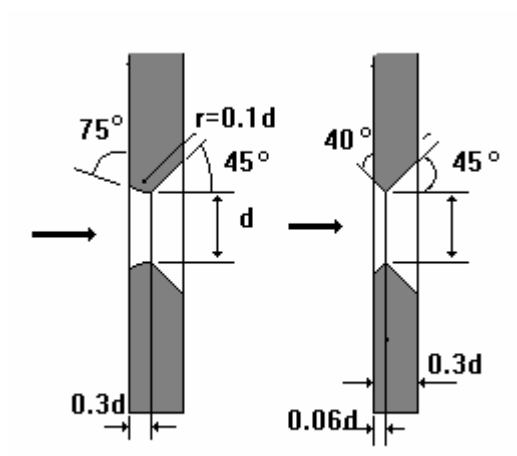
Borda quadrada



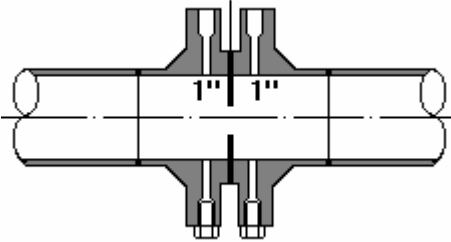
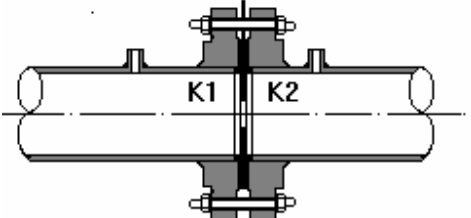
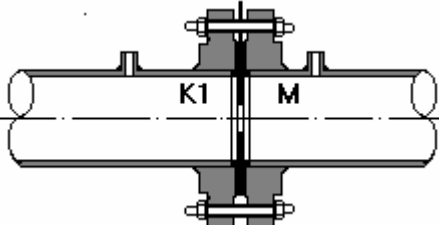
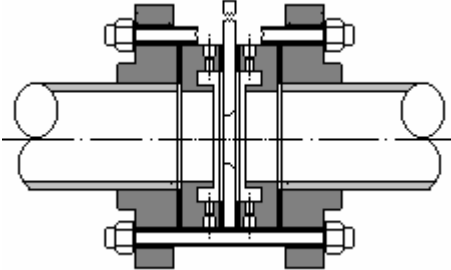

Borda arredondada

C. Borda com entrada cônica:

Usado em aplicações, onde o N° de RD inferior é 25 e em condições severas de viscosidade

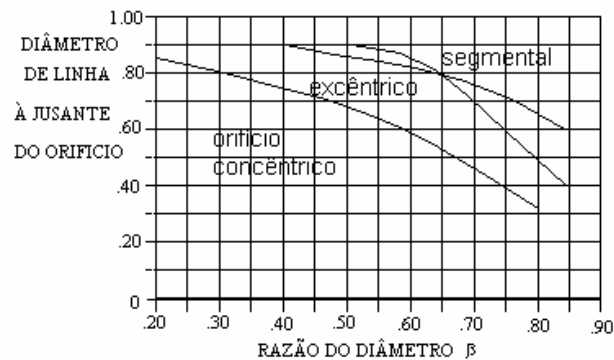


Tipos de tomada de impulso

Denomi- nação na literatura inglesa	Denomi- nação sugerida em portu- guês	Distância da tomada à face montan- te K1	Distância da tomada à face jusante K2	
Flange taps	Tomadas em flanges	1"	1"	
Radius taps	Tomadas à D e 1/2D	1D	1/2D	
Vena contracta taps	Tomadas de vena contracta	1/2 à 2D	Depende de β	
Corner taps	Tomadas de canto	Junto	Junto	
Pipe taps	Tomadas à 2 1/2 D e 8D	2 1/2 D	8D	

As. tomadas em flange: São as mais populares, onde os furos das tomadas já são feitos no próprio flange.

B. Tomadas na vena contracta: Utiliza flanges comuns, sendo o centro da tomada de alta pressão entre $1/2$ e $2D$ (em geral $1D$) e o centro da tomada de baixa estará no ponto de pressão mínima conforme figura abaixo, dependendo do β .



C. Tomadas D e $D/2$: Usada em tubulações de 2" a 30" com Reynolds entre 8000 e 400000 para β entre 0,15 e 0,75

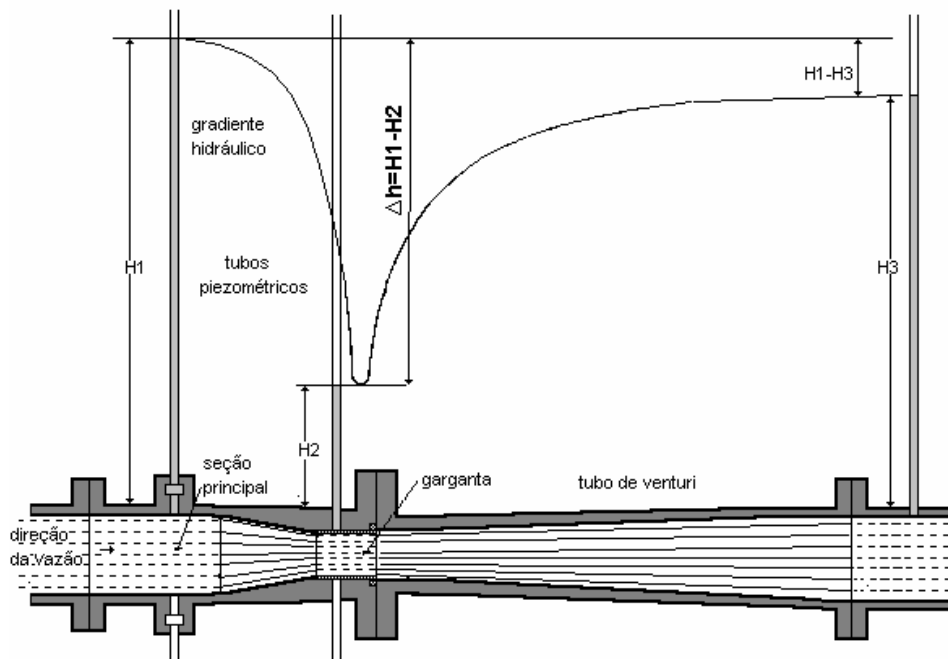
D. Tomadas em canto: São construídas no próprio flange e seu uso principal é em tubulações menores que 2", tendo como desvantagem a grande possibilidade de entupimento.

E. Tomadas de tubulação: Possui o menor diferencial de pressão entre todas tomadas e perdem muita precisão devido a rugosidade do tubo.

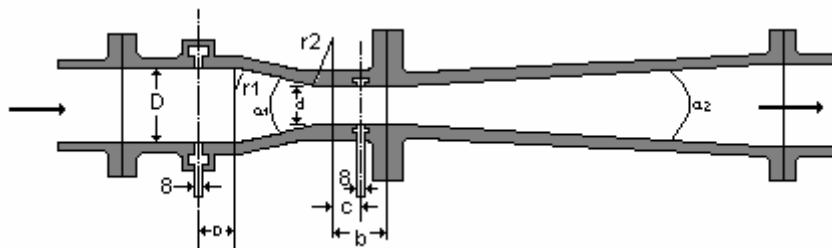
2.2.1.3 TUBO VENTURI

O tubo Venturi, combina dentro de uma unidade simples, uma curta garganta estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalado entre duas flanges, numa tubulações. Seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática.

A recuperação de pressão em um tubo Venturi é bastante eficiente, como podemos ver na figura a seguir, sendo seu uso recomendado quando se deseja um maior restabelecimento de pressão e quando o fluido medido carrega sólidos em suspensão. O Venturi produz um diferencial menor que uma placa de orifício para uma mesma vazão e diâmetro igual à sua garganta.



A figura abaixo, mostra os detalhes de construção de um dispositivo Venturi



onde: .D = Diâmetro interno da tubulação

.d = diâmetro da garganta

.a = Localização da tomada de impulso de alta pressão

0,25D a 0,75D para $4" < D < 6"$

0,25D a 0,50D para $6" < D < 32"$

.b = comprimento da garganta igual a "d"

.c = Localização da tomada de baixa pressão = "d"/2

.δ = Diâmetro interno da tomada de impulso

3/16 a 1/2"

.r1 = 0 a 1,375D

.r2 = 3,5 a 3,75D

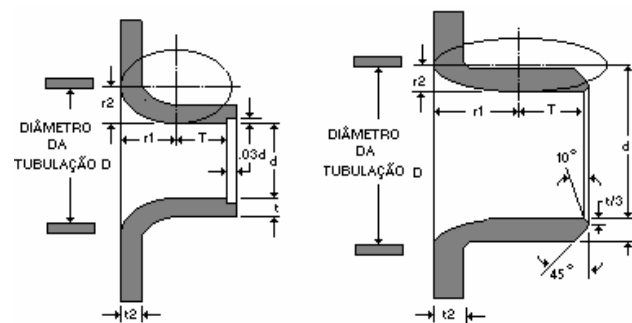
$\alpha 1 = 21^\circ \pm 2^\circ$

$\alpha 2 = 5^\circ$ a 15°

Em lugar de ser um simples furo, a tomada de impulso, é formada por vários furos espaçados em torno do tubo. Eles são interligados por meio de um anel anular chamado anel piezométrico. Isto é destinado para obter-se a média das pressões em torno do ponto de medição.

$$50\text{mm} < D < 400\text{mm}$$

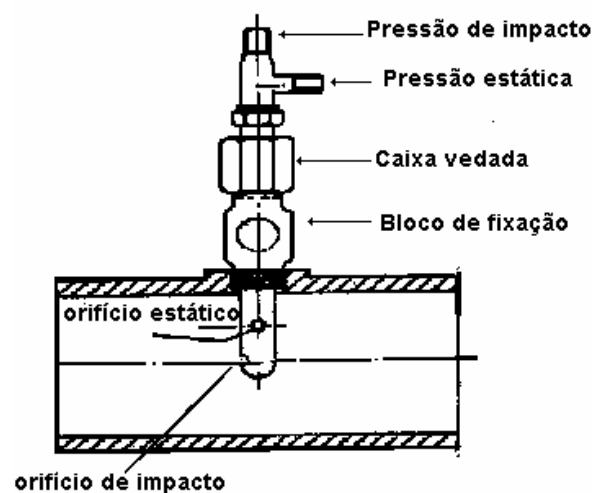
$$10^4 < RD < 10^7$$



2.2.1.5 TUBO PITOT

É um dispositivo para medição de vazão através da velocidade detectada em um ponto da tubulação.

O tubo de Pitot é um tubo com uma abertura em sua extremidade, sendo esta colocada na direção da corrente fluida de um duto. A diferença da pressão total e a pressão estática da linha nos dará a pressão dinâmica, a qual é proporcional ao quadrado da velocidade.



$$P_d = \gamma V^2 / 2g \implies V = \sqrt{P_d \cdot 2g / \gamma}$$

onde:

P_d = Pressão dinâmica = Pressão total - Pressão estática

γ = Peso específico do fluido

V = Velocidade do fluido no ponto de medição

g = Aceleração da gravidade

Ao se determinar a velocidade de um fluido em um duto, sabe-se que ao centro deste a velocidade é máxima e para saber a velocidade média é necessário usar um fator "K" o qual é determinado em função do N° de Reynolds e rugosidade da tubulação. Então:

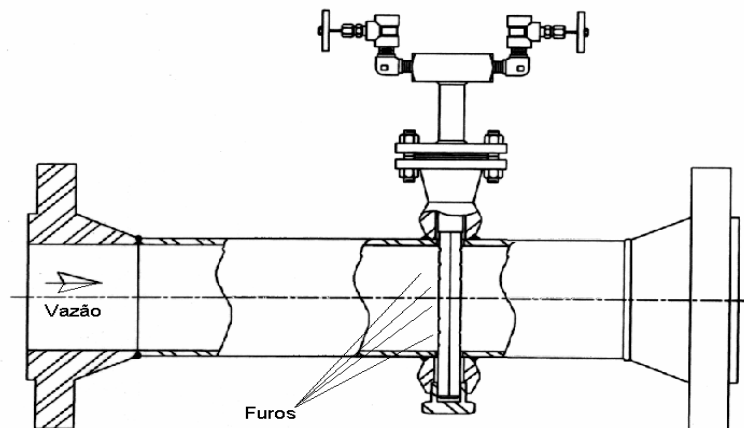
$$V_{\text{medio}} = V^{\text{max}} \cdot K = \sqrt{Pd.2g/\gamma} \cdot K$$

Na prática o fator "K" é descoberto, mantendo-se a vazão constante e medindo-se a velocidade em 10 pontos conforme figura abaixo e em seguida calcula-se a média das 10 velocidades e divide-se pela velocidade máxima encontrando-se o fator "K".

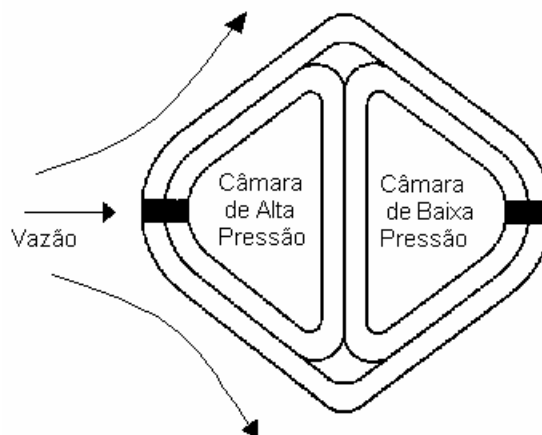
$$K = \frac{V_{\text{medio}}}{V_{\text{max}}} = \frac{(\sum V_1 \dots V_{10}) / 10}{V_{\text{max}}}$$

2.2.1.6 ANNUBAR

O Annubar é um dispositivo de produção de pressão diferencial que ocupa todo o diâmetro do tubo. O annubar é projetado para medir a vazão total, de forma diferente dos dispositivos tradicionais de pressão diferencial.



A parte de alta pressão do sinal de ΔP é produzido pelo impacto do fluido nos furos do sensor, sendo então separado e fluindo em volta do annubar. Precisamente localizados, os furos sensores na parte frontal sentem a pressão de impacto causada pelo fluido.



Após o fluido separar-se em torno do sensor annubar, uma zona de baixa pressão (abaixo da pressão estática no tubo) é criada devido ao formato do sensor. O lado de baixa

pressão do sinal de ΔP é sentido pelos furos na jusante do annubar e é medida na câmara da jusante .

A diferença de pressão é proporcional a raiz quadrada da vazão assim como os medidores anteriores .

Compensação da Pressão e Temperatura

Quando se mede gases e vapores a densidade do fluido variará dependendo da pressão e da temperatura. Por isso, é preciso efetuar a correção com compensação para essa variação. A equação para efetuar a correção se escreve na seguinte forma:

$$Q = K \cdot \sqrt{\frac{P_A \cdot \Delta P}{T_A}} \longrightarrow Q = \text{Nm}^3/\text{h}$$

onde:

Q = vazão

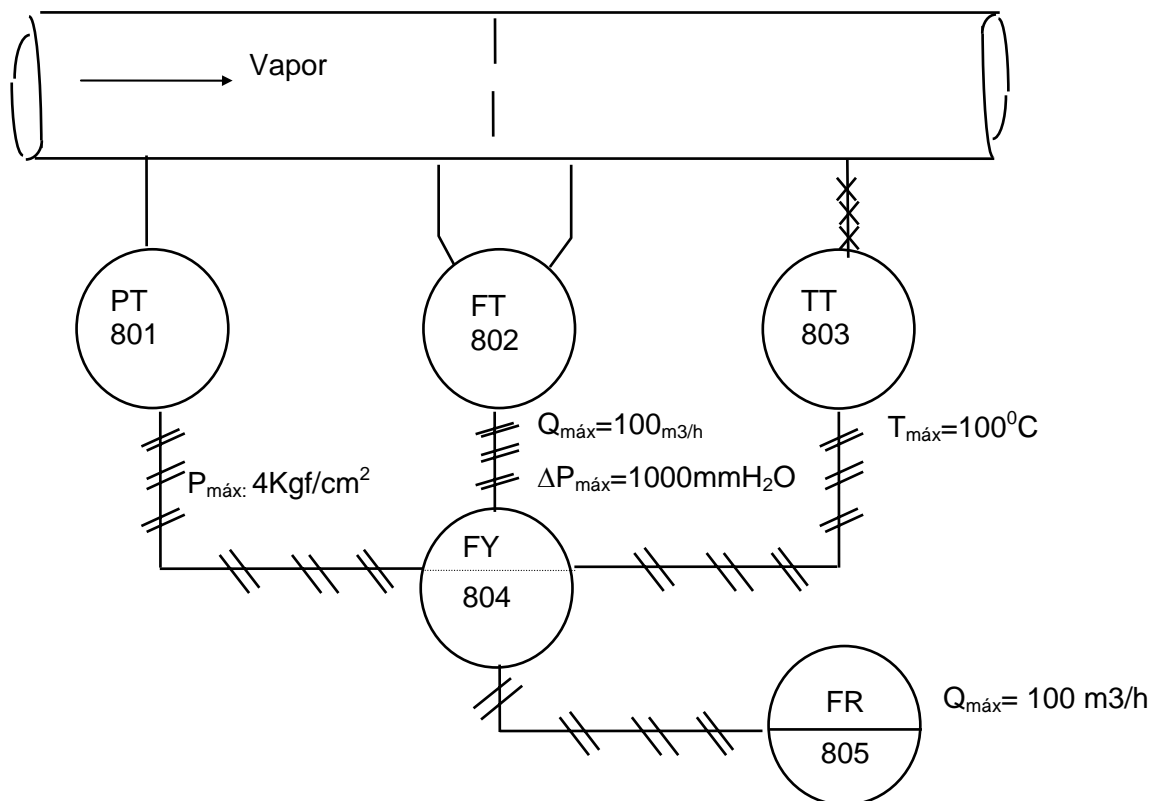
K = constante

P_A = pressão absoluta, bar

T_A = temperatura absoluta, Kelvin

ΔP = pressão diferencial, bar

A seguir mostraremos a malha de controle que faz esta correção.



2.2.2 - Medidores de Vazão por Pressão Diferencial Constante (Área Variável)

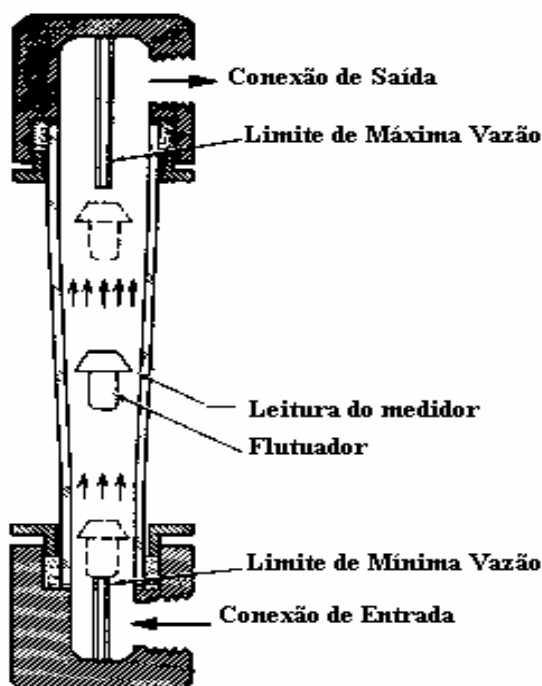
Os dispositivos de pressão diferencial até agora considerados têm por base restrições de dimensão fixa, e a pressão diferencial criada através deles modifica-se com a vazão. Existem, contudo, dispositivos nos quais a área da restrição pode ser modificada para manter constante o diferencial de pressão enquanto muda a vazão; como por exemplo deste princípio utilizaremos o rotâmetro.

2.2.2.1 - ROTÂMETROS

Rotâmetros são medidores de vazão por área variável, nos quais um flutuador varia sua posição dentro de um tubo cônico, proporcionalmente à vazão do fluido.

Basicamente, um rotâmetro consiste de duas partes.

- 1) Um tubo de vidro de formato cônico, o qual é colocado verticalmente na tubulação em que passará o fluido que queremos medir. A extremidade maior do tubo cônico ficará voltada para cima.
- 2) No interior do tubo cônico teremos um flutuador que se moverá verticalmente, em função da vazão medida.



- PRINCÍPIO BÁSICOS

O fluido passa através do tubo da base para o topo. Quando não há vazão, o flutuador permanece na base do tubo e seu diâmetro maior é usualmente selecionado de tal maneira que bloqueie a pequena extremidade do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o

fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve; porém, como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador.

A área de passagem oferece resistência à vazão e a queda de pressão do fluido começa a aumentar. Quando a pressão diferencial, somada ao efeito de empuxo do líquido, excede a pressão devido ao peso do flutuador, então o flutuador sobe e flutua na corrente fluida.

Com o movimento ascendente do flutuador em direção à parte mais larga do tubo, a área anular, entre a parede do tubo de vidro e a periferia do flutuador, aumenta. Como a área aumente, o diferencial de pressão devido ao flutuador decresce. O flutuador ficará em equilíbrio dinâmico quando a pressão diferencial através do flutuador somada ao efeito do empuxo contrabalançar o peso do flutuador.

Qualquer aumento na vazão movimentará o flutuador para a parte superior do tubo de vidro e a diminuição causa uma queda a um nível mais baixo. Cada posição do flutuador corresponde a um valor determinado de vazão e somente um. É somente necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo e a vazão poderá ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

- CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO

As forças que atuam no flutuador estão representadas na figura a seguir.

Para as condições de equilíbrio empregamos as seguintes equações:

$$W = v_f \cdot \gamma_f$$

$$E = v_f \cdot \gamma_l$$

$$F = C_d \cdot \gamma_l \cdot A_f \cdot \frac{V^2}{2g}$$

em que:

W = peso do flutuador

v_f = volume do flutuador

γ_f = peso específico do flutuador

γ_l = peso específico do fluido

F = força de arraste do fluido sobre o

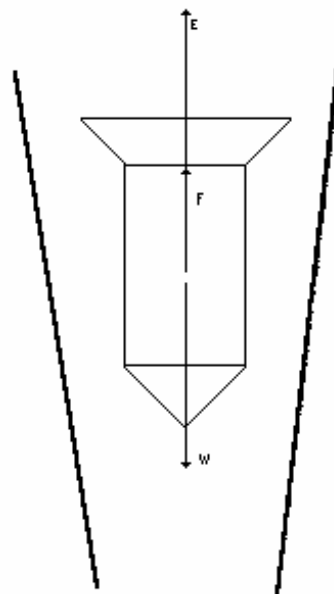
E = força de empuxo do fluido sobre o

C_d = coeficientes de arraste do fluido

V = velocidade do fluido

A_f = área da seção do flutuador

A_w = seção interior do tubo (livre)



flutuador
flutuador
sobre o flutuador

Resolvendo as equações anteriores temos :

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (\gamma_f - \gamma_l)}{C_d \cdot \gamma_l \cdot A_f}}$$

O valor de C_d depende da viscosidade do fluido e da aerodinâmica do flutuador . Por conveniência incorporamos o termo $\sqrt{\frac{1}{C_d}}$ a este coeficiente de descarga , passando a expressão anterior para :

$$V = C_d \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (y_f - y_l)}{y_l \cdot A_f}}$$

Como a vazão é igual a : $Q = V \cdot A_w$ temos:

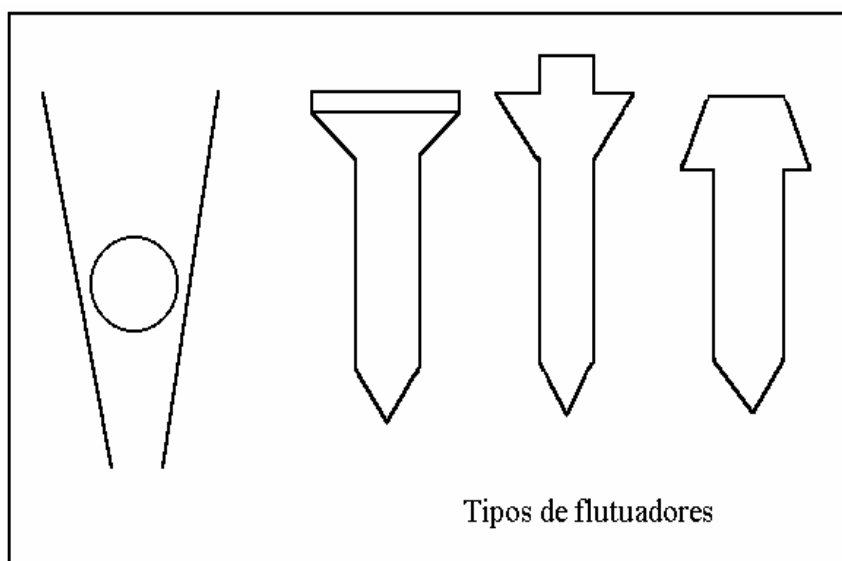
$$Q = C_d \cdot A_w \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot v_f \cdot (y_f - y_l)}{y_l \cdot A_f}}$$

Como todos os dados dentro da raiz são constantes (temperatura e viscosidade constantes) podemos concluir que a vazão varia *linearmente* com a área de passagem , assim , teremos uma escala de leitura também linear.

- Tipos de Flutuadores

Os Flutuadores podem ter vários perfis de construção . Na figura a seguir , podemos ver os tipos mais utilizados :

1. Esférico - Para baixas vazões e pouca precisão ; sofre uma influência considerável da viscosidade do fluido .
2. Cilindro com Borda Plana - Para vazões médias e elevadas ; sofre uma influência média da viscosidade do fluido .
3. Cilindro com Borda Saliente de Face Inclínada para o Fluxo - Sofre menor influência da viscosidade do fluido .
4. Cilindro com Borda Saliente contra o Fluxo - Sofre a mínima influência da viscosidade do fluido .



- Material do flutuador

O material mais empregado nos flutuadores é o aço inox 316 , no entanto , na indústria , para satisfazer outras exigências tais como resistência à corrosão , abrasão e outras utilizam-se outros tipos de materiais . As tabelas a seguir , mostram

os pesos específicos de diversos materiais empregados em flutuadores :

MATERIAL	g/cm ³
Alumínio	2,72
Bronze	8,78
Durimet	8,02
Monel	8,84
Níquel	8,91
Borracha	1,20
Inox 303	7,92

MATERIAL	g/cm ³
Inox 316	8,04
Hastelloy B	9,24
Hastelloy C	8,94
Chumbo	11,38
Tântalo	16,60
Teflon	2,20
Titânio	4,50

- Perda de Carga no Flutuador

A perda de carga do rotâmetro é constante em todo o percurso do flutuador . A perda de carga do flutuador pode ser determinada através da seguinte equação :

$$\Delta P = \frac{W_f - v_f \cdot \gamma_l}{A_f}$$

sendo que :

W_f = peso do flutuador

v_f = volume do flutuador

γ_l = peso específico do líquido

A_f = área transversal máxima

- Fatores de Correção

Se variarmos as condições de trabalho de um rotâmetro já calibrado , é necessário aplicarmos fatores para corrigir a vazão lida . Estes fatores são peso específico do flutuador , peso específico do líquido e temperatura do líquido . Podemos achar o fator de correção através da fórmula abaixo :

$$K = \sqrt{\frac{[\gamma_f2 - \gamma_l2] \cdot \gamma_l1}{[\gamma_f1 - \gamma_l1] \cdot \gamma_l2}}$$

sendo que :

γ_f2 = peso específico do flutuador 2

γ_f1 = peso específico do flutuador 1

γ_l1 = peso específico do líquido 1 ou na temperatura 1

γ_l2 = peso específico do líquido 2 ou na temperatura 2

- Influência da viscosidade

Sua magnitude dependerá da forma do flutuador , da viscosidade do fluido e do espaço anular compreendido entre a superfície do flutuador e a parede interna do tubo , sendo este

um dos fatores que determinarão o No de Reynolds . Quanto maior o No de Reynolds , menor será a influência devido às variações da viscosidade do fluido.

- Instalação

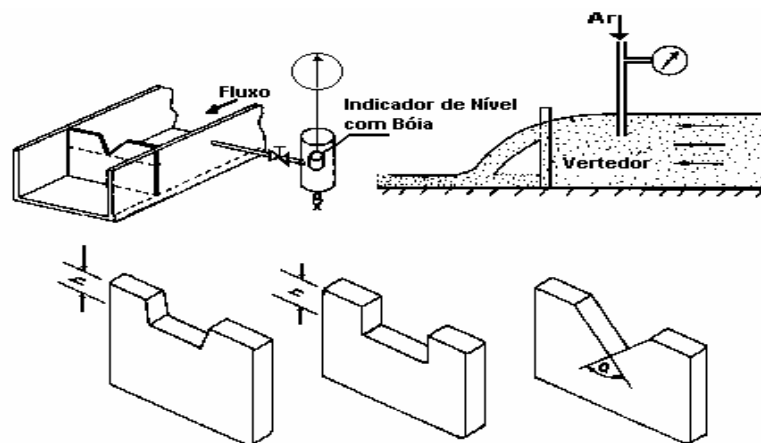
Os rotâmetros são montados verticalmente na tubulação do fluido , cuja vazão se quer medir , de maneira que o fluido seja dirigido de baixo para cima.

2.3 - MEDIDORES DE VAZÃO EM CANAIS ABERTOS

Os dois principais tipos são: o vertedor e a calha de Parshall.

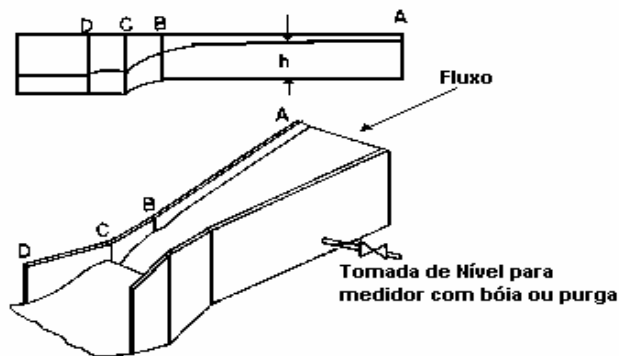
2.3.1 - Vertedor

O vertedor mede a altura estática do fluxo em reservatório que verte o fluido de uma abertura de forma variável.



2.3.2 - Calha de Parshall

O medidor tipo calha de Parshall é um tipo de Venturi aberto que mede a altura estática do fluxo. É um medidor mais vantajoso que o vertedor, porque apresenta menor perda de carga e serve para medir fluidos com sólidos em suspensão.



2.4 - MEDIDORES ESPECIAIS DE VAZÃO

Os principais medidores especiais de vazão são: medidores magnéticos de vazão com eletrodos, tipo turbina, tipo Coriolis, Vortex e Ultra-sônico

2.4.1 Medidor Eletromagnético de Vazão

O medidor magnético de vazão é seguramente um dos medidores mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão. Sua perda de carga é equivalente a de um trecho reto de tubulação, já que não possui qualquer obstrução. É virtualmente insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. Medidores magnéticos são portanto ideais para medição de produtos químicos altamente corrosivos, fluidos com sólidos em suspensão, lama, água, polpa de papel. Sua aplicação estende-se desde saneamento até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias alimentícias. A única restrição, em princípio é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo. Tem ainda como limitação o fato de fluidos com propriedades magnéticas adicionarem um certo erro de medição.

- Aplicação

O medidor eletromagnético é um elemento primário de vazão volumétrica, independente da densidade e das propriedades reológicas do fluido (newtoniano ou não-newtoniano). Este medidor não possui obstrução, e portanto, apresenta uma perda de carga equivalente a um trecho reto de tubulação. Para medição de líquidos limpos com baixa viscosidade o medidor eletromagnético é uma opção. Se o líquido de medição tiver partículas sólidas e abrasivas, como polpa de mineração ou papel, ele é praticamente a única alternativa. Como o mesmo possui como partes úmidas apenas os eletrodos e o revestimento, é possível através de

uma seleção cuidadosa destes elementos, medir fluidos altamente corrosivos como ácidos e bases. É possível, por exemplo a medição de ácido fluorídrico, selecionando-se eletrodos de platina e revestimento de teflon. Outro fluido, particularmente adequado para medição por essa técnica é o da indústria alimentícia. Como o sistema de vedação dos eletrodos não possui reentrâncias, as aprovações para uso sanitário são facilmente obtidas.

- Princípio de Funcionamento: Lei de Faraday

O medidor eletromagnético de vazão é baseado na Lei de Faraday. Esta lei foi descoberta por um cientista inglês chamado FARADAY em 1831, cerca de 165 anos atrás. Segundo esta lei, quando um objeto condutor se move em um campo magnético, uma força eletromotriz é gerada.

A relação entre a direção do campo magnético, movimento do fluido e fem induzida, pode facilmente ser determinada pela regra da mão direita de FLEMING. No caso do medidor eletromagnético o corpo móvel é o fluido que flui através do tubo detetor. Desta forma, a direção do campo magnético, a vazão, e a fem estão posicionadas uma em relação a outra de um ângulo de 90 graus.

- Relação entre a vazão e a fem

De acordo com a Lei de FARADAY, a fem induzida no medidor eletromagnético é expressa pela seguinte equação:

$$E = B \cdot d \cdot V \quad (1)$$

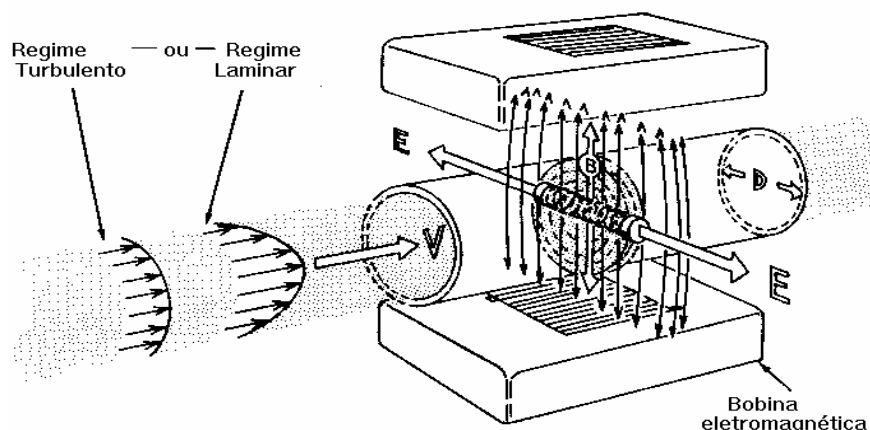
onde: E: fem induzida (V)

B: densidade do fluxo magnético (T)

d: diâmetro interno do detetor (m)

V: velocidade do fluido (m/s)

De acordo com a equação 1, levando-se em consideração que a densidade de fluxo magnético B é constante, temos que a fem é proporcional à velocidade.



Para a vazão temos a seguinte fórmula:

$$Q = S \cdot V \quad (2)$$

onde: Q: vazão
S: área da seção transversal do tubo (m)
V: velocidade média do fluido (m/s)

Fazendo uso das equações (1) e (2), podemos determinar que a fem induzida é proporcional à vazão.

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

$$E = B \cdot d \cdot V \quad (4)$$

Substituindo a equação (3) e (4) na equação (2).

$$Q = S \cdot V$$

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot B \cdot d} E$$

$$Q = \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot B} E \quad (5)$$

Na equação 5, se B constante, então Q será proporcional a E, pois $\pi \cdot d^2 / 4B$ torna-se constante. Em outras palavras, a fem induzida E, se conhecida, irá representar a vazão Q.

- Estrutura do Detetor: Revestimento

Para se conseguir retirar um sinal elétrico proporcional à vazão, é necessário que o interior do tubo seja isolado eletricamente. Se isto não for feito a fem será curto-circuitada e dessa forma, não estará presente nos eletrodos. Se o tubo fosse de material isolante não haveria problema, mas, geralmente o tubo é feito de material condutor. Para evitar que a fem seja curto-circuitada pela parede condutiva do tubo, um isolante tal como teflon, borracha de poliuretano ou cerâmica. A escolha do material isolante é feita em função do tipo de fluido.

- Eletrodo

Eletrodos são dois condutores instalados na parede do tubo, para receber a tensão induzida no fluido. Existem vários materiais de fabricação tais como: aço inox, monel, hastelloy, platina e outros que dependem do tipo de fluido a ser medido.

- Tubo detetor

O material de fabricação do tubo do medidor não pode ser de substâncias ferromagnéticas, tais como aço ou níquel, pois as mesmas causam distúrbios no campo eletromagnético, desta forma é geralmente usado para fabricação do detetor. Na prática o aço inox é o mais usado.

- Influência da condutividade

A influência da condutividade nos medidores de vazão deve ser entendida como se específica a seguir. Considera-se o elemento primário como um gerador simples desenvolvendo uma fem e , conectado em série com a resistência interna do fluido R_f . A fem deste gerador é recebida pelo elemento secundário, que tem uma resistência R_s . A resistência R_f do fluido entre os eletrodos é dada aproximadamente pela seguinte fórmula:

$$R_f = \frac{1}{E \cdot d}$$

onde E é a condutividade do fluido em siemens/ metro (S/m) (=mho/m) e d é o diâmetro dos eletrodos.

Desta forma, a relação da tensão de saída à tensão gerada é:

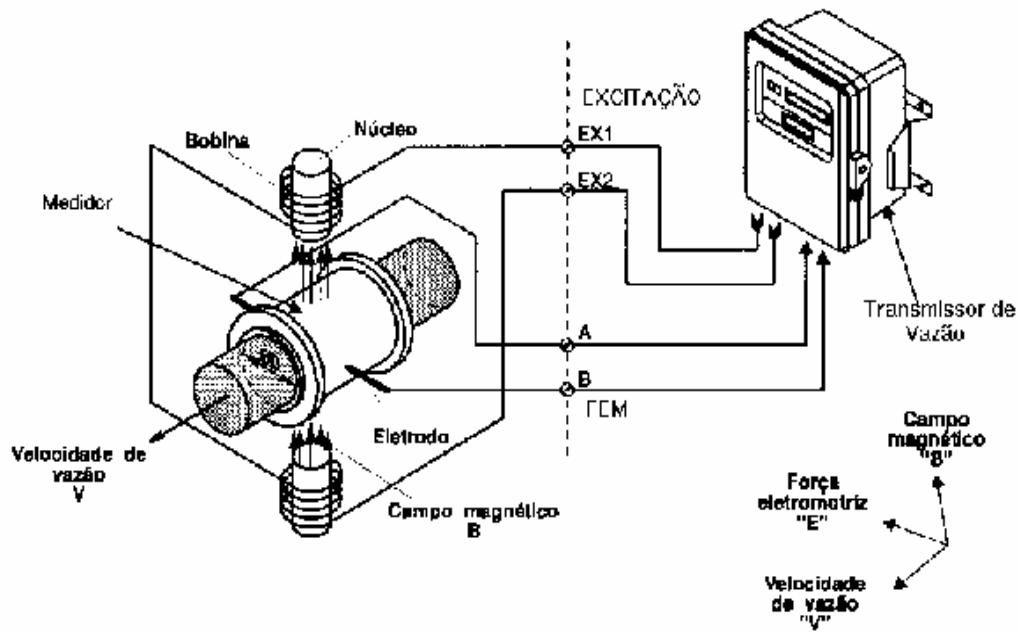
$$\frac{e_s}{e} = 1 - \frac{1}{(1 + R_s \cdot E \cdot d)}$$

Exemplificando: Se a impedância R_s , é de $1 \text{ M}\Omega$ o fluido água com condutividade de $0,01 \text{ S/m}$ e o diâmetro de eletrodo de $0,01 \text{ m}$, temos:

$$\frac{e_s}{e} = 1 - \frac{1}{(1 + 10^6 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2})} = 1 - \frac{1}{1 + 100} = 0,99$$

ou seja, 99%. Se a condutividade do fluido fosse aumentada de um fator 10, a relação acima passaria a 99,9%, ou seja: um aumento de 100% na condutividade só provocaria uma mudança inferior a 1% na relação. Todavia, se a condutividade tivesse diminuído 10 vezes, a relação e_s/e teria passado a 90% ou seja, 10% de variação.

Observamos, então, que, a partir de um certo *limite de condutividade*, que depende de determinadas combinações entre o elemento primário e o secundário, não há problema de influência de condutividade do fluido sobre a precisão da medição, *desde que seja superior aos limites recomendados*.



- Alimentação das bobinas

A grande transformação sofrida pelos medidores eletromagnéticos de vazão, nos últimos anos, foi com relação à forma de excitação das bobinas.

Os quatro tipos principais de excitação são: corrente contínua, corrente alternada, corrente pulsante e frequência dupla simultânea.

Vamos fazer uma comparação técnica entre os quatro tipos citados, ressaltando suas vantagens e desvantagens.

- Formas de Excitação

- Excitação em corrente contínua

A excitação em corrente contínua tem a vantagem de permitir uma rápida detecção da variação de velocidade do fluido, e só é aplicada para casos muito especiais, como por exemplo, metais líquido. Entre as desvantagens deste método, citamos: dificuldade de amplificação do sinal obtido, influência do potencial eletroquímico, fenômeno de eletrólise entre os eletrodos e outros ruídos.

- Excitação em corrente alternada

A excitação CA tem as vantagens de não ser afetada pelo potencial eletroquímico, ser imune à eletrólise, ainda é de fácil amplificação. Por outro lado, temos as desvantagens de vários ruídos surgirem em função da corrente alternada, que são provocados pela indução eletromagnética, chamado de ruído de quadratura, pela corrente de Foucault que provoca o desvio de zero e pelos ruídos de rede que somam-se ao sinal de vazão, e muitas vezes são difíceis de serem eliminados.

- Excitação em corrente contínua pulsada

A excitação em CC pulsada ou em onda quadrada, combina as vantagens dos métodos anteriores e não tem as desvantagens. Não é afetada pelo potencial eletroquímico, pois o campo magnético inverte o sentido periodicamente, mas como durante a medição o campo é constante, não teremos problemas com correntes de Foucault nem com indução eletromagnética que são fenômenos que ocorrem somente quando o campo magnético varia. O ruído da rede é eliminado sincronizando o sinal de amostragem com a frequência da rede e utilizando-se uma frequência que seja um submúltiplo par da frequência da rede, e finalmente a amplificação torna-se simples com amplificadores diferenciais.

- Excitação com frequência dupla simultânea

A corrente de excitação de dupla frequência é aplicada ao tubo de medição, o qual gera um sinal de vazão com a mesma forma de onda. Se um sinal de vazão em degrau é aplicada ao tubo de medição, o sinal de vazão é amostrado e filtrado nos seus componentes de baixa e alta frequência. A seguir essas componentes são somadas reproduzindo o degrau aplicado .

Desse modo a componente de alta frequência responde principalmente às variações rápidas, enquanto que a componente de baixa frequência responde principalmente às variações lentas.

- Aterramento

Por razões de segurança do pessoal e para obter uma medição de vazão satisfatória, é muito importante atender todos os requerimentos dos fabricantes quanto ao aterramento. Uma interligação elétrica permanente entre o fluido, o medidor, a tubulação adjacente e um ponto de terra comum é especialmente importante quando a condutividade do líquido é baixa.

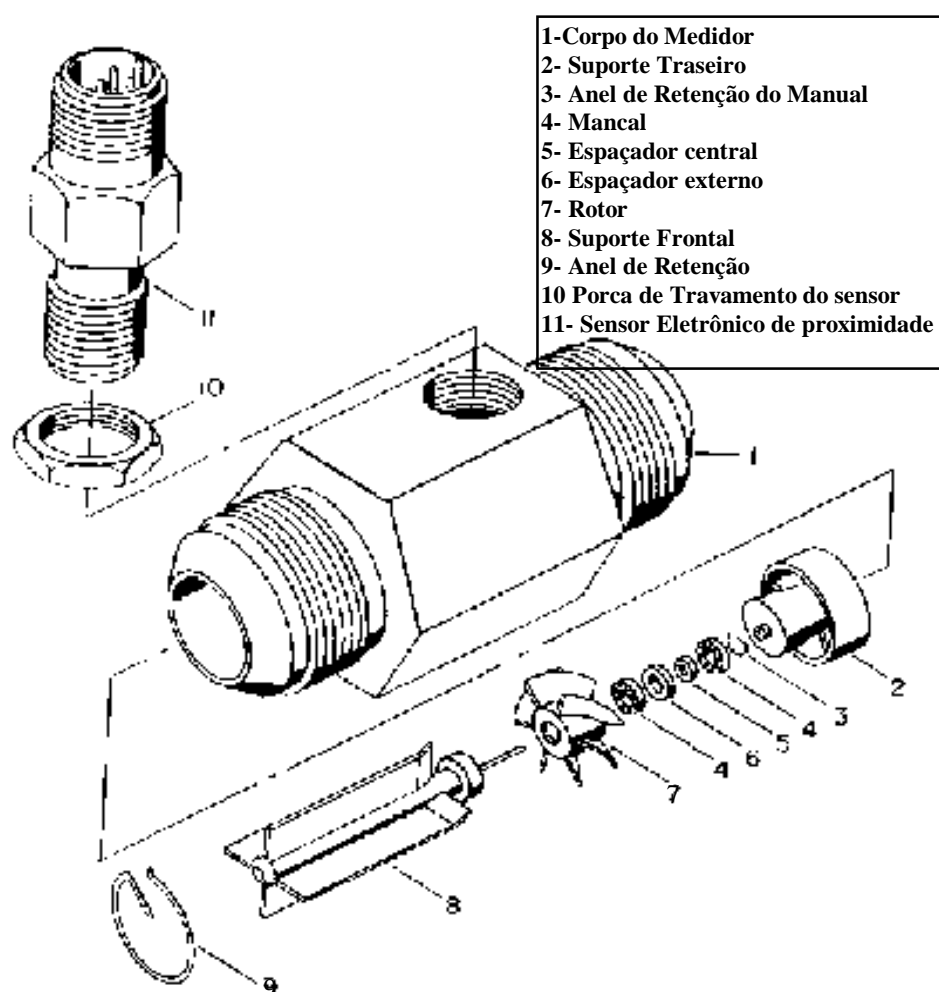
A forma de efetuar o aterramento depende do tipo de medidor (revestimento interno, etc.). Quando o medidor é instalado entre tubulações não-metálicas ou revestidas internamente, é normal instalar anéis metálicos entre os flanges do medidor e a tubulação. Assim é obtido o contato elétrico com o fluido para posterior aterramento. Estes anéis devem ser de diâmetro interno igual ao medidor e de diâmetro externo menor que a circunferência de furos dos flanges do medidor

- Escolha do diâmetro

Os medidores magnéticos industriais apresentam um melhor desempenho relativo à precisão, quando a vazão medida corresponde a uma velocidade apreciável. Devem ser levadas em conta considerações relativas ao compromisso entre a decantação/incrustação e abrasão. Tipicamente, eles têm uma precisão de 1% da escala quando a velocidade que corresponde ao fim da escala de vazão, é superior a 1m/s e 2% quando compreendido entre 0,3 e 1m/s (os valores numéricos citados variam dependendo do fabricante). Os fabricantes apresentam ábacos de escolha para seus medidores onde, conhecendo a velocidade ou a vazão máxima a medir, pode ser determinado o diâmetro do medidor magnético para efetuar a medição.

2.4.2 - Medidor Tipo Turbina

O medidor é constituído basicamente por um rotor montado axialmente na tubulação . O rotor é provido de aletas que o fazem girar quando passa um fluido na tubulação do processo . Uma bobina captadora com um imã permanente é montada externamente fora da trajetória do fluido . Quando este se movimenta através do tubo , o rotor gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor . À medida que cada lâmina passa diante da bobina e do imã , ocorre uma variação da *relutância* do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina . Verifica-se então a indução de um ciclo de tensão alternada . A freqüência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional á velocidade do fluido e a Vazão pode ser determinada pela medição/totalização de pulsos .



- Influência da viscosidade

Como visto acima a freqüência de saída do sensor é proporcional à vazão , de forma que é possível , para cada turbina , fazer o levantamento do coeficiente de vazão K , que é o parâmetro de calibração da turbina , expresso em ciclos(pulsos) por unidade de volume .

Numa turbina ideal este valor K seria uma constante independente da viscosidade do fluido medido . Observa-se , entretanto , que à medida que a viscosidade aumenta , o fator K deixa de ser uma

constante e passa a ser uma função da viscosidade e da frequência de saída da turbina . Abaixo de 2 cSt de viscosidade , o coeficiente \underline{K} é aproximadamente constante para frequências de saída acima de 50 Hz .

- Performance

Cada turbina sofre uma calibração na fábrica , usando água como fluido . Os dados obtidos são documentados e fornecidos junto com a turbina . Usando estes dados obtêm-se o fator médio de calibração \underline{K} relativo à faixa de vazão específica .

O fator é representado pela seguinte expressão:

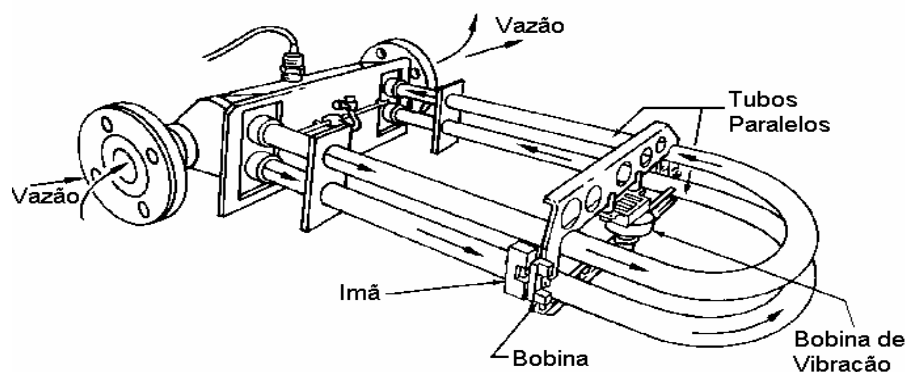
$$\underline{K} = \frac{60.f}{Q}$$

OBS.: Relutância: é a dificuldade que um material magnético oferece as linhas magnéticas, o contrário é permeância.

2.4.3 - Medidor por Efeito Coriolis

É um instrumento de grande sucesso no momento, pois tem grande aplicabilidade desde indústria alimentícia, farmacêutica, química, papel, petróleo etc. e sua medição, independe das variáveis de processo - densidade, viscosidade, condutibilidade, pressão, temperatura, perfil do fluido.

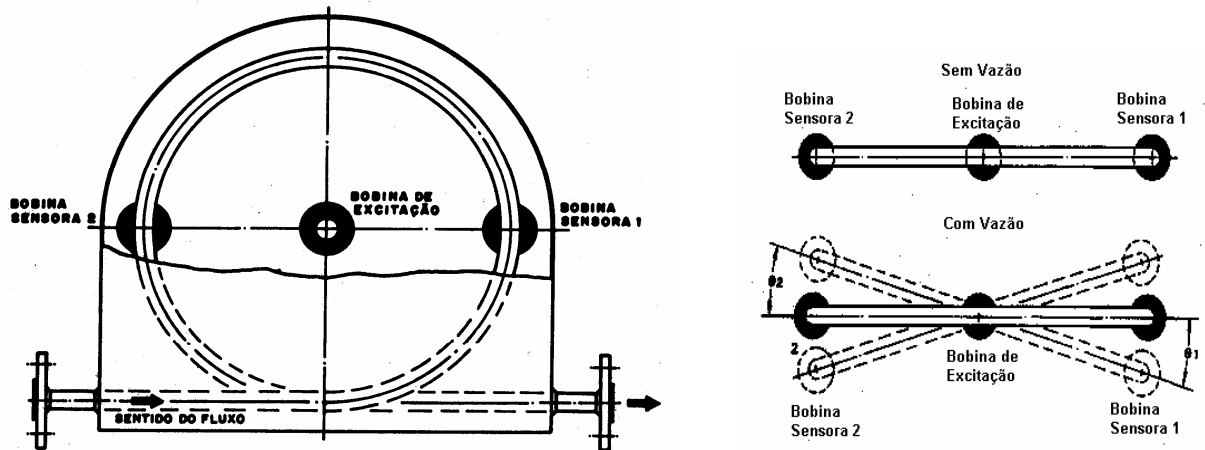
Resumidamente, um medidor Coriolis possui dois componentes: tubos de sensores de medição e transmissor. Os tubos de medição são submetidos a uma oscilação e ficam vibrando na sua própria frequência natural à baixa amplitude, quase imperceptível a olho nu. Quando um fluido qualquer é introduzido no tubo em vibração, o efeito do Coriolis se manifesta causando uma deformação, isto é, uma torção, que é captada por meio de sensores magnéticos que geram uma tensão em formato de ondas senoidais.



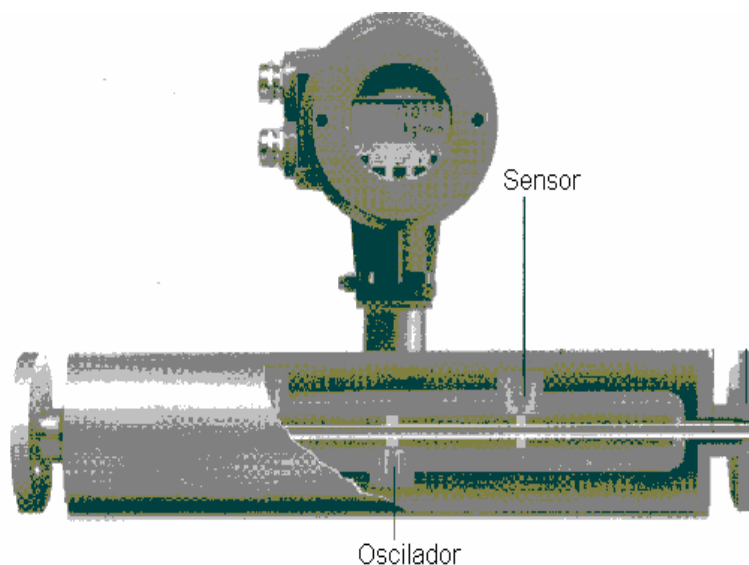
As forças geradas pelos tubos criam uma certa oposição à passagem do fluido na sua região de entrada (região da bobina1) , e em oposição auxiliam o fluido na região de saída dos tubos

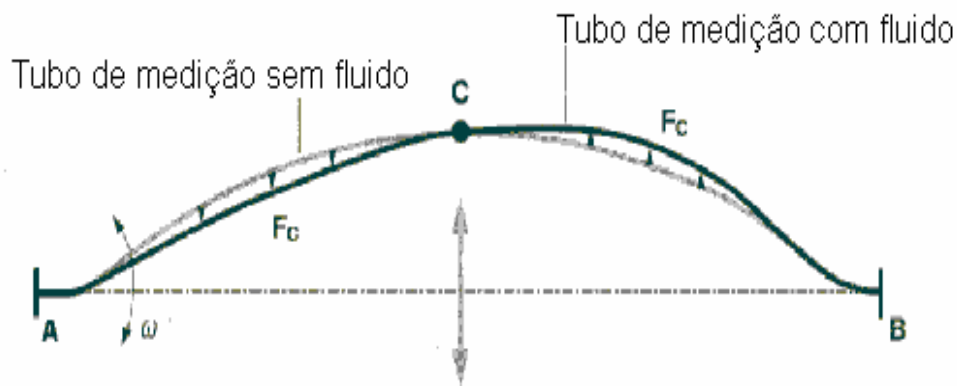
O atraso entre os dois lados é diretamente proporcional à vazão mássica. Um RTD é montado no tubo, monitorando a temperatura deste, a fim de compensar as vibrações das deformações elásticas sofridas com a oscilação da temperatura.

O transmissor é composto de um circuito eletrônico que gera um sinal para os tubos de vazão, alimenta e recebe o sinal de medida, propiciando saídas analógicas 4 à 20 mA, de frequência (0 à 10 mil Hz) e até digital RS 232 e/ou RS 485. Estas saídas são enviadas para instrumentos receptores que controlam bateladas, indicam vazão instantânea e totalizada, ou para PLCs, SDCDs, etc.



Podemos encontrar o modelo com tubo reto, neste modelo, um tubo de medição oscila sobre o eixo neutro A-B sendo percorrido por um fluido com velocidade “v”. Entre os pontos A-C as partículas do fluido são aceleradas de uma baixa para uma alta velocidade rotacional. A massa destas partículas aceleradas geram as forças de Coriolis (F_c) oposta a direção de rotação. Entre os pontos C-B as partículas do fluido são desaceleradas o que leva a força de Coriolis no mesmo sentido da rotação. A força de Coriolis (F_c), a qual atua sobre as duas metades do tubo com direções opostas, é diretamente proporcional à vazão mássica. O método de detecção é o mesmo do sistema anterior.





2.4.4 MEDIDOR DE VAZÃO TIPO VORTEX

- Princípio de funcionamento

Quando um anteparo de geometria definida é colocado de forma a obstruir parcialmente uma tubulação em que escoar um fluido, ocorre a formação de vórtices; que se desprendem alternadamente de cada lado do anteparo, como mostrado na figura abaixo. Este é um fenômeno muito conhecido e demonstrado em todos os livros de mecânica dos fluidos.

Os vórtices também podem ser observados em situações frequentes do nosso dia a dia, como por exemplo:

- movimento oscilatório da plantas aquáticas, em razão da correnteza;
- as bandeiras flutuando ao vento;
- as oscilações das copas das árvores ou dos fios elétricos quando expostos ao vento.

- Equações de caracterização: Velocidade do fluxo e a frequência de vórtices

Assumindo que a frequência de geração dos vórtices provocados por um obstáculo colocado verticalmente no sentido de movimento de um fluido seja “f”, a velocidade do fluido seja “V” e a dimensão do obstáculo perpendicular ao sentido do fluxo seja “d”, a seguinte relação é obtida:

$$f = St \cdot V/d \quad (1)$$

St = número de Strouhal

Esta equação pode ser aplicada a um medidor vortex, quando medindo vazão em uma tubulação de processo. Adicionalmente, neste caso a seguinte expressão também é válida:

$$Q = A \cdot V \quad (2)$$

onde, Q = vazão volumétrica

A = área da seção da tubulação

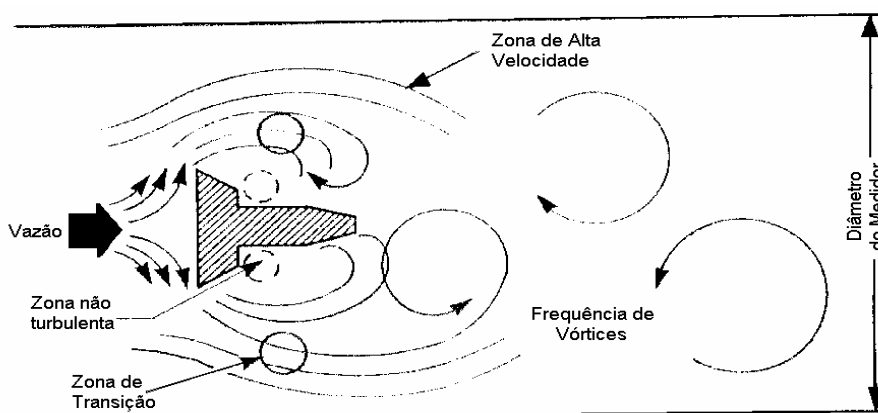
Mediante uma simples substituição, e consideramos os parâmetros constantes agrupados em único fator, teremos:

$$Q = k \cdot f \quad (3)$$

Número de Strouhal- É a relação entre o intervalo “L” entre cada vórtice e a dimensão “d” do anteparo perpendicular ao sentido do fluxo ou seja,

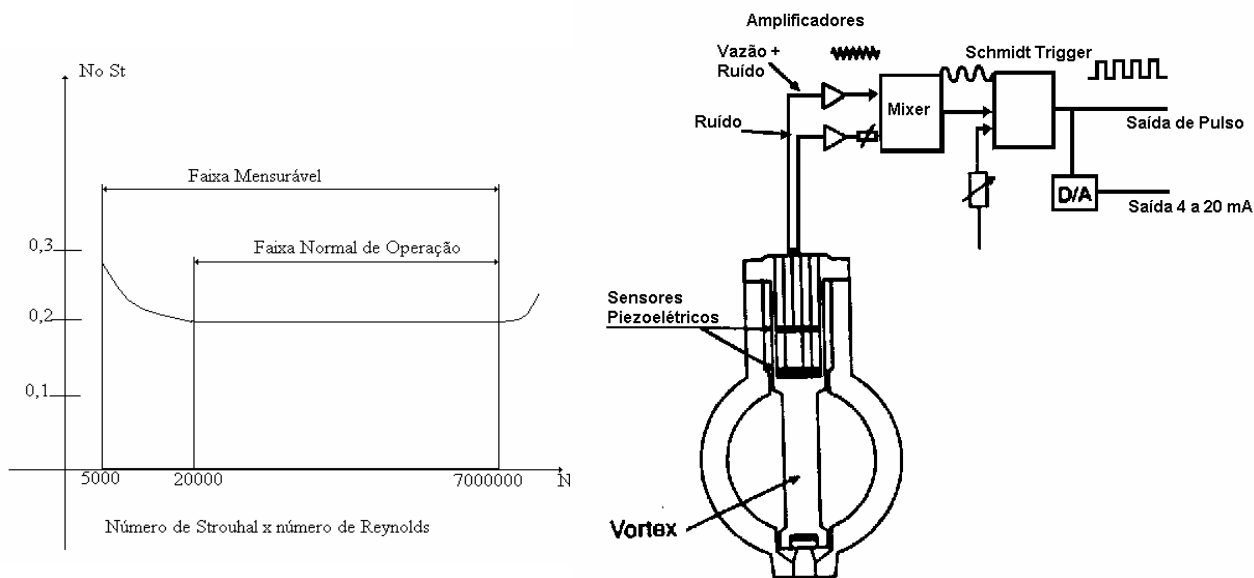
$$St = L/d \quad (4)$$

Logo, conforme pode ser verificado nas expressões acima, se o número de Strouhal for constante, a vazão volumétrica do fluido pode ser medida pela contagem do número de vórtices.



Para uma ampla faixa de número de Reynolds que define o regime de escoamento, temos que St é constante, conforme pode ser verificado no gráfico abaixo. Logo, para a imensa maioria das aplicações industriais, que estão situadas na faixa de número de Reynolds entre 2×10^4 e 7×10^6 , todas as expressões anteriores são totalmente válidas.

Adicionalmente, nesta faixa, a frequência “f” de geração de vórtices não é afetada por variações na viscosidade, densidade, temperatura ou pressão do fluido



- Método de detecção dos vórtices

As duas maiores questões referentes ao desenvolvimento prático de um medidor de vazão, baseado nos princípios anteriormente mencionados, são:

a) A criação de um obstáculo gerador de vórtices (vortex shedder) que possa gerar vórtices regulares e de parâmetros totalmente estabilizados. Isto determinará a precisão do medidor.

b) O projeto de um sensor e respectivo sistema eletrônico para detectar e medir a frequência dos vórtices. Isto determinará os limites para as condições de operação do medidor.

Vortex shedder - Numerosos tipos vortex de shedder, com diferentes formas, foram sistematicamente testados e comparados em diversos fabricantes e centros de pesquisa. Um shedder com formato trapezoidal foi o que obteve um desempenho considerado ótimo.

O corte trapezoidal proporciona excelente linearidade na frequência de geração dos vórtices, além de extrema estabilidade dos parâmetros envolvidos.

Sistema sensor - Vários tipos de sensores têm sido propostos, porém nenhum mostrava-se totalmente adequado para resistir às severas condições de trabalho, as quais o medidor seria submetido no processo. A tabela abaixo apresenta a variedade de sensores que estiveram, ou ainda estão, disponíveis no mercado.

Grandeza Detectada	Sistema de Detecção	Tipo de Sensor
Mudanças na velocidade do fluxo	Troca Térmica	Termistor
	Variações de frequência ultra-sônica	Feixe de Ultra-som
Mudanças de Pressão	Detecção de Pressão Diferencial	Diafragma + Elementos Piezoelétricos
		Diafragma Capacitivo
		Diafragma Indutivo
	Equilíbrio de Movimento	Strain-gauge
		Esfera + Indutância
	Deformações sobre o Vortex shedder	Strain gauge
	Tensão (Stress) sobre o Vortex shedder	Elementos Piezoelétricos

2.5 - MEDIDORES ULTRA-SÔNICOS

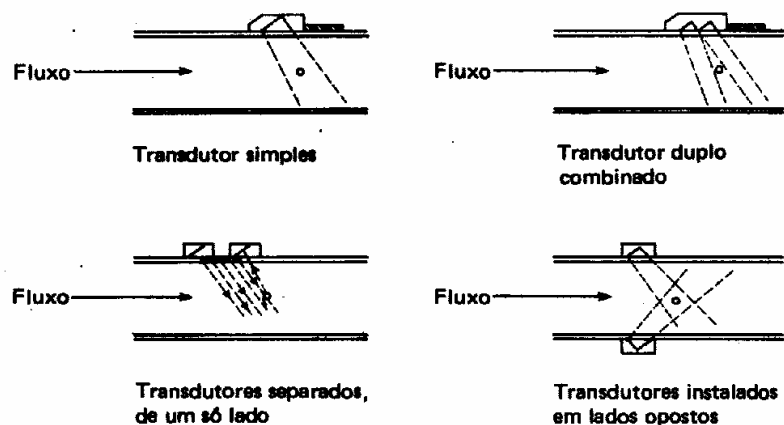
Os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição podem ser divididos em dois tipos principais:

- Medidores a efeito doppler
- Medidores de tempo de trânsito.

Existem medidores ultra-sônicos nos quais os transdutores são presos à superfície externa da tubulação, e outros com os transdutores em contato direto com o fluido. Os transdutores-emissores de ultra-sons consistem em cristais piezoelétricos que são usados como fonte de ultra-som, para enviar sinais acústicos que passam no fluido, antes de atingir os sensores correspondentes.

2.4.5.1 - Medidores de efeito Doppler

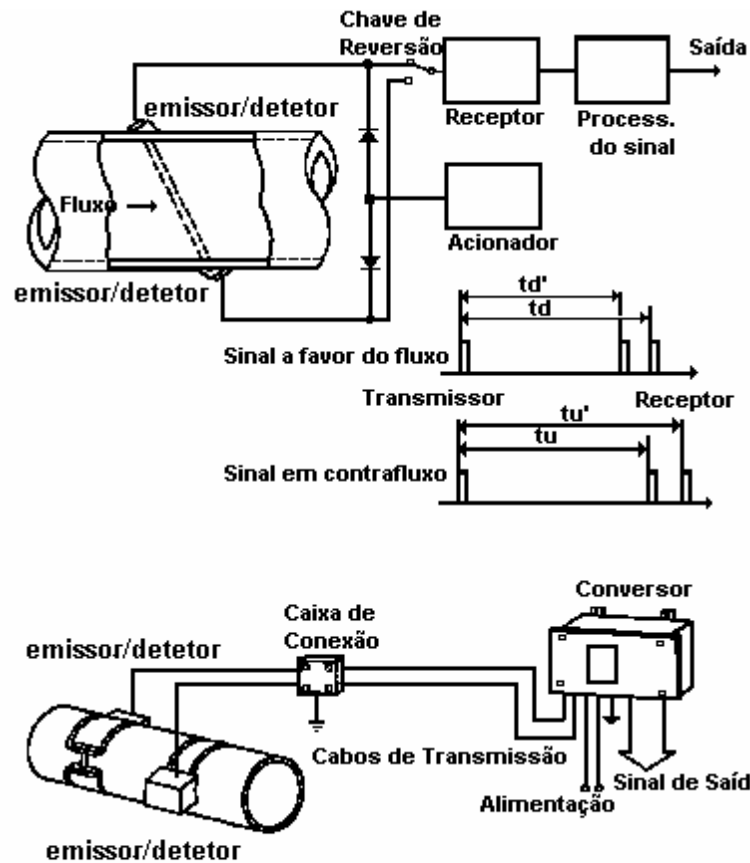
O efeito Doppler é aparente variação de frequência produzida pelo movimento relativo de um emissor e de um receptor de frequência. No caso, esta variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis do fluido. Nos medidores baseados neste princípio (ver figura abaixo), os transdutores-emissores projetam um feixe contínuo de ultra-som na faixa das centenas de khz. Os ultra-sons refletidos por partículas veiculadas pelo fluido têm sua frequência alterada proporcionalmente ao componente da velocidade das partículas na direção do feixe. Estes instrumentos são conseqüentemente adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas.



2.4.5.2 - Medidores de tempo de trânsito

Ao contrário dos instrumentos anteriores, estes instrumentos não são adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas. Para que a medição seja possível, os medidores de tempo de trânsito devem medir vazão de fluidos relativamente limpos. Nestes medidores (ver figura abaixo), um transdutor-emissor-receptor de ultra-sons é fixado à parede externa do tubo, ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas. O eixo que reúne os emissores-receptores forma com o eixo da tubulação, um ângulo α .

Os transdutores transmitem e recebem alternadamente um trem de ondas ultra-sônicas de duração pequena. O tempo de transmissão é levemente inferior (t_1) orientada para a jusante, e levemente superior (t_2) quando orientada para a montante. Sendo L a distância entre os sensores, V_1 a velocidade média do fluido e V_2 a velocidade do som no líquido considerado, temos:



$$\frac{1}{t_1} = \frac{V_s - V_1 \cos \alpha}{L}$$

$$\frac{1}{t_2} = \frac{V_s + V_1 \cos \alpha}{L}$$

A diferença dos tempos de trânsito t_1 e t_2 serve como base de medição da velocidade V_1 .

Os dois tipos de medidores são complementares, já que o primeiro opera com líquidos que contêm partículas sólidas ou gasosas e o segundo requer fluidos limpos. Em ambos os tipos de medidores, o perfil de velocidades da veia fluida deve ser compensado. Nos medidores de efeito Doppler, e dependendo das realizações práticas, a influência da densidade de partículas reflexivas poderá introduzir erros suplementares. Quando a quantidade de partículas for muito grande, as partículas próximas dos sensores, que são as mais lentas, serão as que mais contribuem na reflexão das ondas, introduzindo um erro para menos. Nos medidores de tempo de trânsito, a configuração geométrica do percurso do feixe acústico é perfeitamente definida. Será, então, possível corrigir a leitura adequadamente, levando em consideração o perfil padrão em função do número de Reynolds do escoamento.

Os circuitos eletrônicos dos instrumentos são previstos para eliminar os efeitos das turbulências, efetuando continuamente a média das velocidades numa base de tempo

relativamente longa. É desaconselhada a aplicação destes instrumentos a produtos que depositam na superfície interna do tubo, formando uma camada absorvente de energia acústica.

EXERCÍCIOS

1 - Defina o que é vazão.

2 - Para que serve a medição de vazão?

3 - Faça a conversão das unidades de vazão volumétrica:

a) $32 \text{ m}^3/\text{h}$ = _____ GPM

b) 69 GPM = _____ $\text{Pé}^3/\text{h}$

c) 78 l/min = _____ m^3/min

d) $57 \text{ m}^3/\text{h}$ = _____ BPH

e) 47 BPD = _____ $\text{Pé}^3/\text{min}$

f) $4 \text{ m}^3/\text{h}$ = _____ l/h

g) 6 GPM = _____ l/h

4 - Faça a conversão das unidades de vazão gravimétrica:

a) 104 T/dia = _____ T/h

b) 459 Kg/h = _____ lb/min

c) 756 T/h = _____ Kg/s

d) 984 lb/min = _____ Kg/h

e) 724 Kg/s = _____ lb/s

5 - O que são medidores de quantidade?

6 - Como se divide os medidores de quantidade ?

7 - Aonde são utilizados os medidores de quantidade?

8 - Cite 3 exemplos de medidores de quantidade volumétricos.

9 - O que são os medidores volumétricos?

10 - Como é composto um medidor por pressão diferencial variável?

11 - Cite 3 exemplos de elementos primários de medição de vazão por pressão diferencial.

12 - Defina a placa de orifício.

13 - Defina o tubo venturi.

14 - Defina o bocal.

15 - Defina o tubo Pitot.

16 - Calcule o ΔP no instante em que a vazão é igual a 120 m³/h.

Dados: $Q_{\max} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ $\Delta P_{\max} = 2.000 \text{ mmHg}$

17 - Calcule a vazão em m³/h quando o $\Delta P = 36\%$.

Dados: $Q_{\max} = 500 \text{ l/h}$ $\Delta P_{\max} = 2.360 \text{ mmCA}$

18 - Calcule o ΔP quando a vazão for 2,5 l/s.

Dados: $Q_{\max} = 300 \text{ l/min}$ $\Delta P_{\max} = 30 \text{ mmHG}$

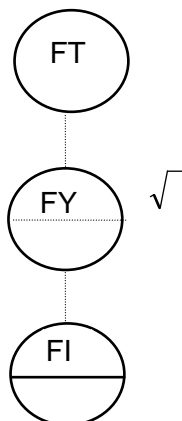
19 - Calcule a vazão em l/h e GPM quando o ΔP for 81%.

Dados: $Q_{\max} = 600 \text{ l/h}$ $\Delta P_{\max} = 1.000 \text{ mmH}_2\text{O}$

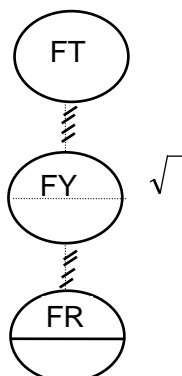
20 - Um FT indica 36% no seu indicador local. Qual é o diferencial de pressão aplicado em suas câmaras neste instante? Qual é a vazão, sabendo-se que a vazão máxima de linha é de 5.000 m³/h, com um diferencial máximo de pressão igual a 81 mmH₂O?

21 - Um FT indica 49% no seu indicador local. Qual é o diferencial de pressão aplicado em suas câmaras neste instante? Qual é a vazão, sabendo-se que a vazão máxima da linha é de 6.000 m³/h, com um diferencial máximo de pressão igual a 100 mmH₂O?

22 - Um FT é instalado em uma linha de processo para medir vazão, o ΔP máximo é de 50" H₂O. Qual é a vazão quando o ΔP for de 20" H₂O e qual será a indicação na escala do FI em %. Dado: $Q_{\max} = 460 \text{ m}^3/\text{h}$.



23 - Um FT é instalado em uma linha de processo para medir vazão, o ΔP máximo é de 80" H₂O. Qual é a vazão quando o ΔP for de 30" H₂O e qual será a indicação na escala do FR em %. Dado: $Q_{\max} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$.



- 24 - Como é composto o medidor de vazão por pressão diferencial constante?
- 25 - Como é constituído basicamente o rotâmetro?
- 26 - Cite dois tipos de medidores em canais abertos.
- 27 - Qual o princípio de funcionamento do vertedor?
- 28 - Qual o princípio de funcionamento da calha de Parshall.
- 29 - Qual o princípio de funcionamento do medidor magnético de vazão com eletrodos.
- 30 - Qual o princípio de funcionamento do medidor tipo turbina.
- 31 - Calcule o fator de calibração da turbina sabendo-se que a vazão é 42 gpm e a frequência de saída de pulsos é 715 Hz .
- 32 - Qual o princípio de funcionamento do medidor de vazão por efeito Coriolis.
- 33 - Qual o princípio de funcionamento do medidor de vazão por Vortex
- 34 - Qual o princípio de funcionamento do medidor de vazão por Ultra-som

CONVERSÃO DE UNIDADES

UNIDADES DE VAZÃO VOLUMÉTRICA

<div>PARA OBTER O RESULTADO EXPRESSO EM</div> <div>MULTIPLICADOR POR</div> <div>O VALOR EXPRESSO EM</div>	m ³ /h	m ³ /min	m ³ /s	GPM	BPH	BPD	pé ³ /h	pé ³ /min
m ³ /h	1	0,016667	0,00027778	4,40287	6,28982	150,956	35,314	0,588579
m ³ /min	60	1	0,016667	264.1721	377.3892	9057,34	2118,8802	35.3147
m ³ /s	3600	60	1	15.850.33	22.643.35	543.440,7	127 132,81	2118,884
Galão por minuto GPM	0,22712	0,0037854	63,09.10 ⁻⁶	1	1.42857	34.2857	8,0208	0,13368
Barril por hora BPH	0,158987	0,0026497	44.161.10 ⁻⁶	0,7	1	24	5.614583	0,0935763
Barril por dia BPD	0,0066245	0,00011041	1.8401.10 ⁻⁶	0,029167	0,041667	1	0,23394	0,0038990
pé ³ /h CFH	0,0283168	0,00047195	7.8657.10 ⁻⁶	0,124676	0,178108	4.2746	1	0,016667
pé ³ /s CFS	1,69901	0,028317	0,00047195	7,480519	10,686	256,476	60	1

UNIDADES DE VAZÃO MÁSSICA

PARA OBTER O RESULTADO EXPRESSO EM		t/dia	t/h	Kg/h	Kg/s	lb/h	lb/min	lb/s
MULTIPLICADOR POR								
O VALOR EXPRESSO EM								
tonelada/dia	t/dia	1	0,041667	41,667	0,011574	91,858	1.5310	0,025516
tonelada/hora	t/h	24	1	1000	0,27778	2204,6	36,7433	0,61239
kilograma/hora	kg/h	0,0240	0,001	1	0,000278	2,2046	0,03674	0,000612
kilograma/segundo	kg/s	86,400	3,6	3600	1	7936,6	132,276	2,2046
libra/hora	lb/h	0,01089	0,0004536	0,4536	0,000126	1	0,01667	0,000278
libra/minuto	lb/min	0,65317	0,02722	27,216	0,00756	60	1	0,01667
libra segundo	lb/s	39,1907	1,63295	1 632,95	0,45360	3600	60	1